مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال یازدهم، شماره دوم (پیاپی ٤١)، تابستان ٩٣، ص ص ٢٦-٩
شاپا ٧٢٨٦-٢٢٥١

یک مدل جدید استوار در طراحی شبکه زنجیره‌ی تأمین تحت عدم قطعیت

محمود مرادی*[1]، مازیار صلاحی[2]، مرضیه بردسیری[3]، علی جمالیان[4]

۱- استادیار، دانشگاه گیلان، گروه مدیریت، رشت، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه گیلان، گروه ریاضی کاربردی، رشت، ایران

۳ - دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان، گروه مدیریت صنعتی، رشت، ایران

۴- دانشجوی دکترای، دانشگاه گیلان، گروه ریاضی کاربردی، رشت، ایران

رسید مقاله: ۳۰ آبان ۱۳۹۲

پذیرش مقاله: ۳۰ فروردین ۱۳۹۳

چکیده

یکی از تصمیمات استراتژیک در زنجیره‌ی‌تأمین، طراحی کارای شبکه است که تأثیر فراوانی برکاهش هزینه‌ها و افزایش سطح رضایتمندی مشتریان دارد و منجر به اداره موفق شبکه می‌شود. از سویی سرعت بالای تغییرات در محیط کسب وکار، بر عدم قطعیت و ابهام موجود در زنجیره افزوده است. به منظور کاهش ریسک و عدم قطعیت حاکم بر پارامترها، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی با سطح استواری بالای بهینگی، مانند بهینه‌سازی استوار ضروری است. در این مقاله با به‌کارگیری یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی، عدد صحیح آمیخته، تخصیص- مکان‌یابی که قابل تعمیم به مسایل واقعی است، با رویکرد بهینه‌سازی استوار توسعه داده شده تا ضمن حفظ انعطاف‌پذیری، پاسخ‌های به دست آمده قابل اتکا باشند. مدل با دو رویکرد استوار، یکی به شدت محافظه‌کارانه و دیگری با درجه محافظه‌کاری قابل کنترل، ارایه می‌شوند. در پایان، مدل‌ها با حل مثال‌های عددی مقایسه شده؛ مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی: زنجیره‌ی‌تأمین، طراحی زنجیره‌ی تأمین، عدم قطعیت، بهینه‌سازی استوار.

۱ مقدمه

با رقابت شدید در بازارهای امروزی و تغییرات سریع ترجیحات مشتری، همراه با توسعه سریع تکنولوژی و جهانی‌سازی، سازمان‌ها مجبورند به جای بنگاه‌های مستقل و منفرد، به عنوان اعضای یک زنجیره‌تأمین عمل کنند. موفقیت یک زنجیره‌ی‌تأمین به هماهنگی یکپارچه همه بنگاه‌ها برای شکل دادن به ساختار یک شبکه مؤثر بستگی دارد. یک شبکه کارآمد منجر به انجام عملیات مقرون به صرفه در سراسر زنجیره می‌شود و واکنش به نیازهای مشتری را تسریع می‌کند [۱]. یک زنجیره‌ی تأمین شامل مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان، تسهیلات، محصولات،

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: m.moradi@guilan.ac.ir

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

مشتریان و روش‌های اداره کردن خرید، موجودی و توزیع می‌شود که مواد خام توسط تأمین‌کنندگان تأمین می‌شوند و محصولات نهایی توسط مشتری نهایی مصرف می‌شوند [۲]. اداره یک زنجیره‌تأمین موفق بستگی به چگونگی طراحی شبکه دارد [۳]. مساله طراحی شبکه یکی از جامع‌ترین مسایل تصمیم‌گیری استراتژیک است که به بهینه‌سازی برای عملیات بلندمدت کارآمد کل زنجیره‌تأمین نیاز دارد. طراحی شبکه، تعداد، موقعیت، ظرفیت و انواع کارخانه‌ها، انبارها و مراکز توزیع مورد استفاده را مشخص می‌نماید. همچنین کانال‌های توزیع و مقدار مواد و اقلام برای مصرف، تولید و حرکت از تولیدکننده به مشتریان را تعیین می‌کند. مسایل طراحی شبکه زنجیره‌ی‌تأمین طیف وسیعی از محدوده فرمول‌بندی را، از نوع تک محصولی ساده به چند محصولی پیچیده و از مدل‌های خطی قطعی به مدل‌های تصادفی غیرخطی پیچیده تحت پوشش قرار می‌دهد [۲]. مساله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین می‌تواند در دسته مسایل تولید– توزیع و تخصیص– مکان‌یابی تسهیلات قرار گیرد. مساله طراحی شبکه معمولاً در دو بخش شامل سطوح تاکتیکی و استراتژیک مطرح است [۴]. در سطح استراتژیک، برنامه‌ریزی زنجیره‌ی‌تأمین شامل تصمیم‌گیری پیکربندی شبکه نظیر تعداد، موقعیت، ظرفیت و تکنولوژی تسهیلات است. در سطح تاکتیکی، برنامه‌ریزی عملکرد زنجیره‌ی‌تأمین شامل مقادیر کل و جریان مواد برای خرید، پردازش و توزیع محصولات می‌شود [۵]. لذا طراحی یک شبکه زنجیره‌ی‌تأمین کارآمد، موفقیت کل زنجیره را تضمین می‌کند. ماهیت پیچیده و پویای روابط میان عامل‌های مختلف، یک درجه از عدم قطعیت را در تصمیمات برنامه‌ریزی به کار می‌گیرد. در فرآیندهای تصمیم برنامه‌ریزی زنجیره‌ی‌تأمین، عدم قطعیت یک فاکتور اصلی است که می‌تواند بر اثربخشی، پیکربندی و هماهنگی زنجیره‌های تأمین اثر گذارد. برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تأمین در یک محیط ناشناخته کاری پیچیده و دشوار است [۶]. با توجه به تعاملات پیچیده امروزی توأم با عدم قطعیت‌ها، ضرورت مقابله با منابع مختلف ریسک مؤثر بر زنجیره‌ی تأمین اجتناب‌ناپذیر می‌باشد [۳]. تأثیر زیاد عدم قطعیت‌ها روی عملکرد این زنجیره، مستلزم مدیریت کارآمد ریسک است. مدیریت ریسک به دنبال اداره عدم قطعیت‌های مختلف زنجیره‌ی تأمین و نتایج مربوط با یک شیوه هماهنگ و ادغام شده است [۳]. مدیریت ریسکی که به کاهش قابل توجه آسیب‌پذیری زنجیره‌ی تأمین منجر شود؛ به طوری‌که زنجیره را انعطاف‌پذیرتر می‌سازد [۷]. معمولاً شرایط عدم اطمینان در هر سه جنبه مساله طراحی شبکه زنجیره‌ی‌تأمین، یعنی ریسک طرف تقاضا، ریسک طرف عرضه و ریسک طرف پردازش در نظر گرفته می‌شوند [۶].

ریسک‌ها نوعاً به عنوان ریسک سیستماتیک و ریسک غیر سیستماتیک طبقه‌بندی می‌شوند. ریسک سیستماتیک ناشی از عوامل غیرقابل اجتناب در محیط است که کارفرما هیچ کنترلی روی آن ندارد. مانند اختلال طرف عرضه، عدم قطعیت طرف تقاضا، تغییرات قانونی، حقوقی و اداری، وقوع حوادث فاجعه بار و اختلال زیر ساخت. ریسک غیر سیستماتیک ناشی از فاکتورهایی است که در داخل به وسیله شرکت تا حد زیادی کنترل می‌شوند. مانند اختلال تسهیلات سیستم فرعی تولیدی [۸].

تکنیک‌های زیادی برای کنترل عدم قطعیت در شرایط عدم اطمینان و روش‌های مختلفی به منظور کاهش، تعیین مقدار و حل مسایل عدم قطعیت وجود دارد. برنامه‌ریزی پویا، تئوری مجموعه فازی و برنامه‌ریزی تصادفی از جمله این روش‌ها هستند [۶]. برای اداره مسایل بهینه‌سازی براساس عدم قطعیت و مسایل بهینه‌سازی با

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

پارامترهای دارای اغتشاش، چندین تکنیک پیشنهاد شده است. رایج‌ترین رویکرد بهینه‌سازی استوار است که توجهات زیادی را در سال‌های اخیر به خود معطوف کرده [۹].

با توجه به تغییرپذیری مقدار پارامترها روی بازه‌ای از مقادیر و همچنین وجود منابع مختلف عدم قطعیت در زنجیره‌ی تأمین؛ برای اینکه مدل‌های طراحی شده در تمامی سناریوهای آینده قابل قبول و قابل پیاده‌سازی بوده و اعتماد کافی به نتایج وجود داشته باشد، باید برنامه‌ریزی قابل اتکا و استوار انجام شود تا مدیران بتوانند به نتایج آن اطمینان داشته باشند؛ ریسک تصمیم‌گیری آن‌ها کاهش یابد و زنجیره‌ی تأمین به گونه‌ای اثربخش مدیریت شود. در این مقاله از بهینه‌سازی استوار با لحاظ عدم قطعیت روی داده‌ها استفاده شده است. در این رویکرد به دنبال جواب‌های نزدیک به بهینه هستیم که با احتمال بالایی موجه باشند. به عبارت دیگر با کمی صرف‌نظر از تابع هدف، موجه بودن جواب‌های به دست آمده تضمین می‌شود. البته در مورد عدم قطعیت در ضرایب تابع هدف، با کمی صرف‌نظر از مقدار تابع هدف بهینه به‌دنبال جوابی هستیم که با احتمال بالایی جواب‌های واقعی بهتر از آن جواب باشند. در این مقاله دو رویکرد بهینه سازی استوار، یکی به‌شدت محافظه‌کارانه و دیگری رویکرد با درجه محافظه‌کاری قابل کنترل استفاده می‌گردد. رویکرد به‌شدت محافظه‌کارانه، بدبینانه‌ترین رویکرد می‌باشد؛ به این معنا که برای اطمینان از استوار بودن جواب در این رویکرد به میزان زیادی از بهینگی مساله اسمی دور می‌شویم و در رویکرد با درجه محافظه‌کاری قابل کنترل، قابلیت تنظیم استواری جواب بهینه و سطوح حفاظت وجود دارد. به عبارتی میزان محافظه‌کاری آن قابل تنظیم است و منجر به یک مدل بهینه‌سازی خطی می‌شود.

هدف از این مقاله، ارایه یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی، عدد صحیح آمیخته، تخصیص- مکان‌یابی، چندمحصولی، چندمنبعی، چندمرحله‌ای، چندظرفیتی و تک دوره‌ای است که می‌تواند به مسایل واقعی‌تر تعمیم داده شود که با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار بتواند در شرایط عدم قطعیت حاکم بر پارامترهای طراحی زنجیره‌ی تأمین بهینگی خود را حفظ کرده؛ کارا باشد. در مسایل مکان‌یابی- تخصیص تعداد، مکان، اندازه، ظرفیت کارخانه ها و توزیع‌کننده‌های مورد نیاز برای تأمین محصولات مشتریان و تخصیص تقاضای مشتریان به این کارخانجات و توزیع کنندگان تعیین می‌شود که در مسایل گوناگون در بخش‌های دولتی و خصوصی، اعم از صنعتی و غیرصنعتی کاربرد دارد. هدف در نظر گرفته شده، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، پردازش و حمل و نقل و همچنین ریسک موجود در زنجیره‌ی تأمین را حداقل می‌کند.

۲ مروری بر تحقیقات مشابه

مدل‌های طراحی زنجیره‌تأمین در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته و مقالات زیادی در این زمینه به رشته تحریر در آمده است. در این بخش مقالاتی مرتبط با عدم قطعیت و رویکردهای مختلف نسبت به مدیریت ریسک در طراحی زنجیره‌تأمین بررسی می‌شود.

جورجیدس و همکارانش [۱۰] یک مدل پویا و دقیق طراحی و راه‌اندازی شبکه زنجیره‌ی تأمین را متشکل از تسهیلات تولیدی چندمحصولی با منابع تولید مشترک، انبارها، مراکز توزیع و مناطق مشتریان بررسی کردند. آن‌ها یک مساله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته، چهار مرحله‌ای را در نظر گرفتند و هدف مثال حداقل کردن

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

کل هزینه سالانه مورد انتظار شبکه بود که همه محدودیت‌های ساختاری و راه‌اندازی را مورد توجه قرار دادند و بهینگی سراسری با استفاده از تکنیک‌های استاندارد شاخه و کران حل شده است.

آزارون و همکارانش [۱۱] یک مساله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته تصادفی، دو مرحله‌ای، چند هدفه را برای طراحی زنجیره‌ی تأمین بر اساس عدم قطعیت توسعه دادند. هزینه‌های توسعه ظرفیت و کمبود، حمل و نقل، پردازش، عرضه و تقاضا همه به عنوان پارامترهای عدم قطعیت در نظر گرفته شدند. مدل چند هدفه آن‌ها شامل موارد زیر می‌شود:

۱. حداقل کردن جمع هزینه‌های سرمایه‌گذاری جاری و هزینه‌های توسعه ظرفیت و کمبود، حمل و نقل، پردازش مورد انتظار آینده.
۲. حداقل کردن واریانس هزینه کل.
۳. حداقل کردن ریسک مالی یا احتمال دریافت نکردن بودجه خاص

برای حداقل کردن این معایب، یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استوار را توسعه دادندکه با استفاده از تکنیک‌های دستیابی به هدف، حل شده است.

یو و گراسمن [۱۲] یک مساله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته چنددوره‌ای را که تصمیمات دقیق طراحی، نمودارها و برنامه‌های تولید و موجودی شبکه پردازش زنجیره‌ی تأمین با مشخصات مختلف از زمان تأخیر مورد انتظار فرموله شده است، ارایه کردند. آن‌ها در این مدل تصمیمات استراتژیک بلندمدت را با تصمیمات کوتاه‌مدت عملیاتی، برای فرایندهای چندرتبه‌ای، چندمکانی شبکه زنجیره‌ی تأمین ادغام نمودند. هدف آن‌ها حداکثر کردن ارزش خالص فعلی و حداقل کردن تأخیر مورد انتظار است. این مدل همچنین شامل رویکردی برای پیش بینی میزان سهام ایمن با درنظر گرفتن پاسخگویی، عدم قطعیت تقاضا و اهداف اقتصادی می‌شود. چهار نوع محدودیت شامل، محدودیت‌های ساختار شبکه، برنامه‌ریزی عملیاتی، برنامه‌ریزی دوره‌ای و احتمالی، در این مدل گنجانده شده است.

سالما و همکارانش [۱۳] یک مدل جدید که هر دو جنبه برنامه‌ریزی و توزیع را در زمینه یک شبکه لجستیک معکوس در نظر می‌گیرد، ارایه کردند. این مدل برای یک محیط چند محصولی با ظرفیت محدود و عدم قطعیت در تقاضا و بازده در نظر گرفته شد. این مدل براساس مدل شبکه بازیابی (RNM) پیشنهاد شده توسط فلیچمن و همکارانش در سال ۲۰۰۱ است. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته را که توسعه‌ای از مدل RNM است و با استفاده از تکنیک‌های استاندارد شاخه‌وکران حل شده ارایه دادند.

گیلن و همکارانش [۱۴] مساله طراحی و بازسازی یک زنجیره‌ی تأمین متشکل از چندین کارخانه تولیدی، عمده‌فروش‌ها، بازارها و سیستم‌های توزیع مرتبط را درنظر گرفتند. آن‌ها این مساله را به عنوان یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته تصادفی چند هدفه که با استفاده از روش استانداردε-constraint و تکنیک‌های شاخه‌وکران حل شده ارایه دادند. این مدل نه تنها سود زنجیره‌تأمین و سطوح رضایت مشتری بلکه همچنین عدم قطعیت با استفاده از مفهوم ریسک مالی را محاسبه می‌کند.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

مدل نیکل و همکارانش [۱۵] یک مساله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته تصادفی چندمرحله‌ای، چندمحصولی، چنددوره‌ای با تصمیمات مالی و مدیریت ریسک است. هدف آن‌ها حداقل کردن هزینه کل که با توجه به سرمایه‌گذاری‌های انجام شده، درآمدها و هزینه‌های حمل و نقل محاسبه گردیده است که برآمده از برنامه معادل قطعی است. تنظیمات اساسی برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین توسط یک زنجیره‌ی تأمین با دو رتبه: تسهیلات (مانند مراکز توزیع و عمده فروشی) و مشتریان تعریف شده. هدف آن‌ها یافتن تصمیمات بهینه در هر دوره مرتبط با موقعیتی از تسهیلات، سرمایه‌گذاری برای ساختن و جریان محصولات از طریق شبکه می‌باشد.

سینگ و همکارانش [۱۶] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای را برای طراحی یک شبکه مبتنی بر ظرفیت زنجیره‌تأمین ارایه دادند که برای تقاضاهای متغیر، با توجه به هزینه حمل موجودی و هزینه فرصت از دست رفته در نظر گرفته می‌شود. مدل آن‌ها، برنامه‌ریزی لجستیک را بهبود می‌دهد و به دنبال مکان مطلوب شبکه است. علاوه براین متغیرهای تصمیم، گره‌های مختلف(مکان تسهیلات رده‌ها) از زنجیره‌تأمین را نشان می‌دهد. در این مدل‌ها دو نوع متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای مرحله اول که مرتبط با وجود، موقعیت و ظرفیت‌های کارخانه هستند. این متغیرها در ماهیت قطعی‌اند. متغیرهای مرحله دوم با عدم قطعیت پارامترها یا پارامترهای وابسته به زمان وفق داده می‌شوند.

نجمی و همکارانش [۱۷] یک مدل غیرخطی عدد صحیح آمیخته ارائه کردند. شبکه مورد بررسی آن‌ها یک شبکه چند کالایی و چند رده‌ای است که در نتیجه آن مکان‌های مناسب تأسیس مراکز مورد نظر که شامل مراکز تولید/ بازیافت، مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری/ بازرسی و مراکز انهدام مشخص می‌شوند. دیگر خروجی مدل مقدار جریان بهینه بین تمامی تسهیلات موجود در شبکه با هدف حداقل سازی هزینه‌ها است. این مساله چند محصولی با روش‌های دقیق حل شده است.

تبریزی و رزمی [۳] یک مدل ریاضی غیرخطی عدد صحیح آمیخته، تخصیص- مکان‌یابی، چندمحصولی، چندمنبعی، چندمرحله‌ای، چندظرفیتی را توسعه دادند که عدم قطعیت‌ها را به وسیله تئوری فازی بیان نمودند و برای حل مساله از تجزیه و تحلیل بندرز استفاده کردند.

در این مقاله یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی، عدد صحیح آمیخته، تخصیص- مکان‌یابی، چندمحصولی، چندمنبعی، چندمرحله‌ای، چندظرفیتی بر اساس مدل پیشنهادی توسط تبریزی و همکاران [۳] ارایه می‌شود. آن‌ها عدم قطعیت را به صورت فازی در مساله مدل کرده‌اند اما در این مقاله با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار که قادر است در شرایط عدم قطعیت حاکم بر پارامترهای طراحی زنجیره‌ی تأمین (همه طرف‌های عرضه، تقاضا، پردازش) بهینگی خود را حفظ کرده؛ کارا باشد. با در نظر گرفتن عدم قطعیت خطی، مدل استوار مساله با دو رویکرد به شدت محافظه‌کارانه و محافظه‌کارانه قابل کنترل محاسبه می‌شود.

۳ فرمول‌بندی مساله

مدل پیشنهادی برای مساله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تخصیص– مکان‌یابی در حالت چندمحصولی، چندمرحله‌ای، چندظرفیتی، چندمنبعی و تک دوره‌ای است. عدم قطعیت‌های مختلف که برای اعمال شبکه درنظر

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

گرفته شده‌اند؛ ممکن است توسط ریسک‌های طرف عرضه، تقاضا، پردازش تهدید شوند. فرضیات، شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم در ادامه تعریف شده‌اند:

۳-۱ مفروضات

- یک محصول معین که کامل شده است؛ یک‌باره از تأمین‌کنندگان به مشتریان منتقل می‌شود.
- همه مقادیر مربوط به هزینه‌ها، تقاضاها و ظرفیت‌ها غیر قطعی هستند.
- ریسک‌های مشخص شده می‌توانند به‌خوبی توسط بهینه‌سازی استوار مدیریت شوند.
- همه کارخانه‌ها و توزیع‌کنندگان می‌توانند فقط با یکی از ظرفیت‌های بالقوه‌شان ایجاد شوند.
- کارخانه‌ها و توزیع‌کنندگان دایر می‌توانند نیازمندی‌هایشان را از بیشتر از یک کارخانه و تأمین‌کننده به‌خصوص تأمین کنند.
- تعداد کارخانه‌های دایر و توزیع‌کنندگان نمی‌تواند از حد بالای از قبل تعیین شده تجاوز کند.
- همه تقاضاهای مشتریان باید تأمین شوند.

جدول ۱. اندیس‌ها

S	مجموعه تأمین‌کنندگان
P	مجموعه محصولات
K	مجموعه کارخانه‌ها
C	مجموعه ظرفیت های کارخانه
J	مجموعه توزیع‌کنندگان
R	مجموعه ظرفیت‌های توزیع‌کننده
I	مجموعه مشتریان

جدول ۲. متغیرهای تصمیم

z_s	اگر تأمین کننده s انتخاب شود ۱ در غیر این صورت صفر
x_{kc}	اگر کارخانه k با ظرفیت c دایر شود ۱ در غیر این صورت صفر
y_{jr}	اگر توزیع کننده j با ظرفیت r دایر شود ۱ در غیر این صورت صفر
m_{spk}	نسبت محصول p انتقال داده شده از تأمین کننده s به کارخانه k
n_{kpj}	نسبت محصول p انتقال داده شده از کارخانه k به توزیع کننده j
q_{jpi}	نسبت محصول p انتقال داده شده از توزیع کننده j به مشتری i

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

جدول ۳. پارامترهای مدل

a_{kc}	هزینه ثابت ایجاد کارخانه k با ظرفیت c
f_{jr}	هزینه ثابت ایجاد توزیع کننده j با ظرفیت r
α_{jr}	ظرفیت توزیع کننده j با سطح عملکرد r
γ_s	ظرفیت تأمین کننده s
w_{kc}	ظرفیت کارخانه k باسطح عملکرد c
d_{ip}	تقاضای مشتری i برای محصول p
e_{kp}	هزینه واحد پردازش محصول p در کارخانه k
β_{jp}	هزینه واحد خروجی برای محصول p در توزیع کننده j
g_{spk}	هزینه واحد انتقال محصول p از تأمین کننده s به کارخانه k
b_{kpj}	هزینه واحد انتقال محصول p از کارخانه k به توزیع کننده j
c_{jpi}	هزینه واحد انتقال محصول p از توزیع کننده j به مشتری i

۳-۲ مدل مساله

با توجه به تعاریف مجموعه ها، متغیرها و پارامترهای این مساله در جداول ۱ تا ۳، مدل مساله به صورت زیر است:

$$Z_p = Min \qquad (۱)$$

$$\sum_{k=۱}^{K}\sum_{c=۱}^{C} a_{kc}x_{kc} + \sum_{j=۱}^{J}\sum_{r=۱}^{R} f_{jr}y_{jr} + \sum_{k=۱}^{K}\sum_{c=۱}^{C}\sum_{p=۱}^{P}\sum_{j=۱}^{J}\sum_{r=۱}^{R} \alpha_{jr}e_{kp}n_{kpj}y_{jr}x_{kc} + \sum_{j=۱}^{J}\sum_{r=۱}^{R}\sum_{p=۱}^{P}\sum_{i=۱}^{I} d_{ip}\beta_{jp}y_{jr}q_{jpi} +$$

$$\sum_{k=۱}^{K}\sum_{p=۱}^{P}\sum_{j=۱}^{J}\sum_{r=۱}^{R} \alpha_{jr}b_{kpj}n_{kpj}y_{jr} + \sum_{j=۱}^{J}\sum_{p=۱}^{P}\sum_{i=۱}^{I} d_{ip}c_{jpi}q_{jpi} + \sum_{s=۱}^{S}\sum_{p=۱}^{P}\sum_{k=۱}^{K}\sum_{c=۱}^{C} w_{kc}g_{spk}m_{spk}x_{kc}$$

s.t.

$$\sum_{j=۱}^{J} q_{jpi} = ۱, \qquad \forall i, p$$

$$\sum_{c=۱}^{C} x_{kc} \le ۱, \qquad \forall k$$

$$\sum_{r=۱}^{R} y_{jr} \le ۱, \qquad \forall j$$

$$\sum_{k=۱}^{K}\sum_{c=۱}^{C} x_{kc} \le X$$

$$\sum_{j=۱}^{J}\sum_{r=۱}^{R} y_{jr} \le Y$$

$$\sum_{k=۱}^{K}\sum_{c=۱}^{C}\sum_{p=۱}^{P} w_{kc}m_{spk}x_{kc} \le \gamma_s z_s, \qquad \forall s$$

$$\sum_{p=۱}^{P}\sum_{j=۱}^{J}\sum_{r=۱}^{R} \alpha_{jr}n_{kpj}y_{jr} \le \sum_{c=۱}^{C} w_{kc}x_{kc}, \qquad \forall k$$

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

$$\sum_{p=1}^{P}\sum_{i=1}^{I} d_{ip} q_{jpi} \le \sum_{r=1}^{R} \alpha_{jr} y_{jr}, \qquad \forall j$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{r=1}^{R} \alpha_{jr} y_{jr} n_{kpj} \le \sum_{s=1}^{S}\sum_{c=1}^{C} w_{kc} m_{spk}, \qquad \forall k, p$$

$$\sum_{i=1}^{I} d_{ip} q_{jpi} \le \sum_{k=1}^{K}\sum_{r=1}^{R} \alpha_{jr} n_{kpj} y_{jr}, \qquad \forall j, p$$

$$0 \le m_{spk} \le 1, \quad 0 \le n_{kpj} \le 1, \quad 0 \le q_{jpi} \le 1$$

$$x_{kc}, y_{jr}, z_s \in \{0,1\}, \qquad \forall k, c, j, r, s.$$

رابطه اول نشان‌دهنده تابع هدف در مدل طراحی زنجیره‌ی تأمین است که به صورت حداقل کردن هزینه‌ها، شامل کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه، هزینه‌های مرتبط با حمل و نقل محصول و پردازش واحد است. محدودیت اولِ مدل تضمین می‌کند که تقاضای مشتری برای هر محصول باید تأمین شود. محدودیت دوم و سوم اطمینان می‌بخشد که به ترتیب حداکثر یک سطح ظرفیت برای کارخانه و توزیع‌کننده در نظر گرفته می‌شود. محدودیت چهارم و پنجم به ترتیب حداکثر تعداد مجاز تأسیس را برای کارخانه‌ها و توزیع‌کنندگان نشان می‌دهد. محدودیت ششم نشان می‌دهد که کل محصولات انتقال داده شده از هر تأمین‌کننده در دسترس برای کارخانه‌ها نمی‌تواند از ظرفیت تأمین‌کننده تجاوز کند. محدودیت‌های هفتم و هشتم نیز همین مساله را به ترتیب در مورد حداکثر ظرفیت کارخانه‌ها و توزیع‌کنندگان در دسترس بیان می‌کنند. به عبارت دیگر، حداکثر ظرفیت کارخانه‌ها و توزیع‌کنندگان در دسترس را نشان می‌دهد. محدودیت نهم نشان می‌دهد که کل محصول پردازش شده p که از کارخانه k به کار گرفته می‌شود؛ نمی‌تواند از کل ورودی تأمین‌کنندگان دردسترس برای کارخانه پیشی بگیرد. به عبارتی، مقدار محصول پردازش شده نمی‌تواند از مقدار ورودی‌ها بیشتر باشد. محدودیت دهم بیان می‌کند که کل خروجی محصول p از توزیع کننده j برای مشتریان نباید از مقدار مربوط وارد شده برای توزیع کننده از کارخانه‌های در دسترس تجاوز کند. محدودیت‌های یازدهم و دوازدهم به محدودیت متغیرها با توجه به نوع تعریف و ماهیت آن‌ها، به شرایط غیر منفی مقادیر منتقل شده؛ به طبیعت دودویی متغیرهای تصمیم‌گیری مربوط اشاره می‌کند.

۳-۳ مدل خطی شده (حالت قطعی)

مدل ارایه شده یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی است که شامل عبارات حاصل‌ضربی متغیرهای دودویی و پیوسته است. این نوع حالت خاصی از عبارات غیرخطی است که می توان آن را به فرم خطی تبدیل نمود و از مزایای برنامه‌ریزی خطی بهره برد. بدین منظور، یک روش خطی‌سازی به کار گرفته می‌شود که در آن حاصل‌ضرب یک متغیر عدد صحیح و یک متغیر پیوسته توسط یک متغیر جدید جای‌گزین می‌شود که به صورت زیر است:
اگر $y \le x_1 x_2$ و x_1 یک متغیر دودویی باشد و $0 \le x_2 \le M$، آنگاه رابطه خطی زیر برقرار است [۱۸]:

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

$$y \le M x_1,$$
$$y \le x_2,$$
$$y \ge x_2 - (1 - x_1)M,$$
$$y \ge 0.$$

از آنجا که در این مساله $0 \le x_2 \le 1$ است؛ بنابراین $M = 1$ و رابطه‌های قبل به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$y \le x_1,$$
$$y \le x_2,$$
$$y \ge x_2 - (1 - x_1),$$
$$y \ge 0.$$

به منظور ساده‌تر شدن مراحل حل مدل، عبارات تابع هدف به صورت محدودیت آورده می‌شود؛ بنابراین خطی شده، مدل ارایه شده به صورت زیر است:

$$Min \quad \sum_{i=1}^{7} t_i \qquad (2)$$

s.t.

$$\sum_k \sum_c a_{kc} x_{kc} \le t_1$$
$$\sum_j \sum_r f_{jr} y_{jr} \le t_2$$
$$\sum_k \sum_c \sum_p \sum_j \sum_r \alpha_{jr} e_{kp} n'_{kpjcr} \le t_3$$
$$\sum_j \sum_p \sum_i \sum_r d_{ip} \beta_{jp} q'_{jpir} \le t_4$$
$$\sum_k \sum_p \sum_j \sum_r \alpha_{jr} b_{kpj} n''_{kpjr} \le t_5$$
$$\sum_j \sum_p \sum_i d_{ip} c_{jpi} q_{jpi} \le t_6$$
$$\sum_s \sum_p \sum_k \sum_c w_{kc} g_{spk} m'_{spkc} \le t_7$$
$$\sum_j q_{jpi} = 1$$
$$\sum_c x_{kc} \le 1$$
$$\sum_r y_{jr} \le 1$$
$$\sum_k \sum_c x_{kc} \le X$$
$$\sum_j \sum_r y_{jr} \le Y$$
$$\sum_k \sum_p \sum_c w_{kc} m'_{spkc} \le \gamma_s z_s, \qquad \forall s$$

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

$$\sum_p \sum_j \sum_r \alpha_{jr} n''_{kpjr} \le \sum_c w_{kc} x_{kc}, \qquad \forall k$$

$$\sum_p \sum_i d_{ip} q_{jpi} \le \sum_r \alpha_{jr} y_{jr}, \qquad \forall j$$

$$\sum_j \sum_r \alpha_{jr} n''_{kpjr} \le \sum_s \sum_c w_{kc} m'_{spkc}, \qquad \forall k, p$$

$$\sum_i d_{ip} q_{jpi} \le \sum_k \sum_r \alpha_{jr} n''_{kpjr}, \qquad \forall j, p$$

$$q'_{jpir} \le q_{jpi}$$

$$q'_{jpir} \le y_{jr}$$

$$q'_{jpir} \ge q_{jpi} - (1 - y_{jr})$$

$$m'_{spkc} \le m_{spk}$$

$$m'_{spkc} \le x_{kc}$$

$$m'_{spkc} \ge m_{spk} - (1 - x_{kc})$$

$$n''_{kpjr} \le n_{kpj}$$

$$n''_{kpjr} \le y_{jr}$$

$$n''_{kpjr} \ge n_{kpj} - (1 - y_{jr})$$

$$n'_{kpjcr} \le n''_{kpjr}$$

$$n'_{kpjcr} \le x_{kc}$$

$$n'_{kpjcr} \ge n''_{kpjr} - (1 - x_{kc})$$

$$0 \le q', q, m, m', n, n', n'' \le 1$$

$$x, y, z \in \{0, 1\}.$$

٤ مدل استوار

مدلی که در بخش قبل ارایه شد تلاش می‌کند هزینه زنجیره‌تأمین را حداقل نماید ولی با این حال پس از تحقق تقاضای بازار و در جهان واقعی، مقدار واقعی هزینه‌ها می‌تواند بسیار متفاوت از ارزش تابع هدف شود. برای کاهش میزان این اختلاف، در این بخش مدل استوار مساله ارایه می‌شود.

رویکردی که در سال‌های اخیر برای مقابله با عدم قطعیت داده‌ها بسط داده شده است؛ بهینه‌سازی استوار است. در این رویکرد به دنبال جواب‌های نزدیک به جواب بهینه هستیم که با احتمال بالایی موجه باشند. به عبارت دیگر با کمی صرف‌نظر کردن از تابع هدف، موجه بودن جواب به دست آمده تضمین می‌شود. البته در مورد عدم قطعیت در ضرایب تابع هدف، با کمی صرف‌نظر کردن از مقدار تابع هدف بهینه، به دنبال جوابی هستیم که با احتمال بالایی جواب‌های واقعی بهتر از آن جواب باشند [۱۹]. اصطلاح بهینه‌سازی استوار برای در برگرفتن چندین روش برای محافظت از تصمیم‌گیرنده در برابر ابهام پارامترها و عدم قطعیت تصادفی به کار گرفته می‌شود [۲۰]. در مباحث بهینه‌سازی استوار به ازای هر مساله حاوی پارامترهای نامطمئن یک مدل استوار

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

ارایه می‌شود که همتای استوار نامگذاری شده است. با توجه به این که استوارسازی این مدل با دو رویکرد به شدت محافظه‌کارانه و با درجه محافظه‌کاری قابل کنترل ارایه می‌شود؛ در ادامه ابتدا توضیحی در این خصوص بیان و سپس مدل ریاضی استوار برای مدل پیشنهادی ارایه می‌گردد.

۴-۱ همتای استوار مدل با درجه محافظه‌کاری قابل کنترل

مدل برنامه‌ریزی خطی زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\begin{aligned} &Min \quad c^T x \\ &s.t. \\ &\quad \sum_i a_{ij} x_j \le b_i, \qquad \forall i, \\ &\quad l_j \le x_j \le u_j, \qquad \forall j. \end{aligned} \tag{۳}$$

در این رویکرد [۲۱] هر کدام از ضرایب محدودیت‌ها a_{ij} و $j \in N = \{1,2,...,N\}$ به صورت یک متغیرتصادفی مستقل، با توزیع متقارن ولی ناشناخته $\hat{a}_{ij}$, $j \in N$ مدل می‌شود که در بازه $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ مقدار می‌گیرد. $\hat{a}_{ij}$ نشاندهنده‌ی انحراف از ضریب اسمی a_{ij} است. هر کدام از ضرایب تابع هدف c_j , $j \in N$ در بازه $[c_j - d_j, c_j + d_j]$ مقدار می‌گیرد که d_j نشان دهنده‌ی انحراف از ضریب اسمی c_j می‌باشد. گفتنی است؛ از آن‌جا که تابع هدف حداقل‌سازی است و هدف مدل‌های استوار به‌دست آوردن حداکثر تأسف می‌باشد؛ تنها یک طرف بازه گفته شده مورد استفاده قرارمی‌گیرد. یعنی فرض می‌شود که c_j در بازه $[c_j, c_j + d_j]$ مقدار می‌گیرد. برای فرمول‌بندی همتای استوار مساله، Γ_i به صورت زیر تعریف می‌شود.

نقش Γ_iها در محدودیت‌ها تنظیم نمودن میزان استواری روش پیشنهادی در مقابل سطح محافظه‌کاری جواب است. Γ_i را سطح حفاظت برای محدودیت iام می‌نامیم. پارامتر Γ_0 سطح استواری در تابع هدف را کنترل می‌کند؛ بنابراین می‌خواهیم مقدار جواب بهینه را در حالت‌هایی پیدا کنیم که Γ_0 تا از ضرایب تابع هدف تغییر کند و بیشترین تأثیر را روی جواب بگذارد. همتای استوار مدل به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$Min \quad c^T x + z_0 \Gamma_0 + \sum_{j \in J_0} p_{0j} \tag{۴}$$

$$\begin{aligned} &s.t. \\ &\quad \sum_i a_{ij} x_j + z_i \Gamma_i + \sum_{j \in J_i} p_{ij} \le b_i, \qquad \forall i \\ &\quad z_0 + p_{0j} \ge d_j y_j, \qquad \forall j \in J_0 \\ &\quad z_i + p_{ij} \ge \hat{\alpha}_{ij} y_j, \qquad \forall i \ne 0, j \in J_i \\ &\quad p_{ij} \ge 0, \qquad \forall i, j \in J_i \\ &\quad y_j \ge 0, \qquad \forall j \\ &\quad z_i \ge 0, \qquad \forall j \\ &\quad -y_j \le x_j \le y_j, \qquad \forall j \\ &\quad l_j \le x_j \le u_j, \qquad \forall j \end{aligned}$$

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

بدین ترتیب همتای استوار مدل با درجه محافظه‌کاری قابل کنترل عبارتست از:

(۵)

$$Min \quad \sum_{i=1}^{7} t_i$$

s.t.

$$\sum_k \sum_c a_{kc} x_{kc} + \sum_k \sum_c pa_{kc} + \Gamma_a \theta_a \le t_1$$

$$pa_{kc} + \theta_a \ge \hat{a}_{kc} x_{kc}$$

$$\sum_j \sum_r f_{jr} y_{jr} + \sum_j \sum_r pf_{jr} + \Gamma_f \theta_f \le t_2$$

$$pf_{jr} + \theta_f \ge \hat{f}_{jr} y_{jr}$$

$$\sum_k \sum_c \sum_p \sum_j \sum_r \bar{\alpha}_{jr} \bar{e}_{kp} n'_{kpjcr} \le t_3$$

$$\sum_j \sum_p \sum_i \sum_r \bar{d}_{ip} \bar{\beta}_{jp} q'_{jpir} \le t_4$$

$$\sum_k \sum_p \sum_j \sum_r \alpha_{jr} b_{kpj} n''_{kpjr} \le t_5$$

$$\sum_j \sum_p \sum_i \bar{d}_{ip} \bar{c}_{jpi} q_{jpi} \le t_6$$

$$\sum_s \sum_p \sum_k \sum_c \bar{w}_{kc} \bar{g}_{spk} m'_{spkc} \le t_7$$

$$\sum_j q_{jpi} = 1$$

$$\sum_c x_{kc} \le 1$$

$$\sum_r y_{jr} \le 1$$

$$\sum_k \sum_c x_{kc} \le X$$

$$\sum_j \sum_r y_{jr} \le Y$$

$$\sum_k \sum_p \sum_c w_{kc} m'_{spkc} - \gamma_s z_s + \sum_k \sum_c u_{skc} + v_s + \Gamma_s \theta_s \le 0$$

$$\theta_s + u_{skc} \ge \hat{w}_{kc} \eta_{spkc}$$

$$v_s + \theta_s \ge -\hat{\gamma}_s z_s$$

$$-\eta_{spkc} \le m'_{spkc} \le \eta_{spkc}$$

$$\sum_i \bar{d}_{ip} q_{jpi} - \sum_k \sum_r \underline{\alpha}_{jr} n''_{kpjr} \le 0$$

$$\sum_p \sum_j \sum_r \alpha_{jr} n''_{kpjr} - \sum_c w_{kc} x_{kc} + \sum_j \sum_r u'_{kjr} + \sum_c v'_{kc} + \Gamma_k \theta'_k \le 0$$

$$\theta'_k + u'_{kjr} \ge \hat{\alpha}_{jr} \eta'_{kpjr}$$

$$v'_{kc} + \theta'_k \ge -\hat{w}_{kc} x_{kc}$$

$$-\eta'_{kpjr} \le n''_{kpjr} \le \eta'_{kpjr}$$

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

$$\sum_p \sum_i d_{ip} q_{jpi} - \sum_r \alpha_{jr} y_{jr} + \sum_i \sum_p u''_{jpi} + \sum_r v''_{jr} + \Gamma_j \theta''_j \le ٠$$

$$\theta''_j + u''_{jpi} \ge \hat{d}_{ip} \eta''_{jpi}$$

$$v''_{jr} + \theta''_j \ge -\hat{\alpha}_{jr} y_{jr}$$

$$-\eta''_{jpi} \le q_{jpi} \le \eta''_{jpi}$$

$$\sum_j \sum_r \bar{\alpha}_{jr} n''_{kpjr} - \sum_s \sum_c \underline{w}_{kc} m_{spk} \le ٠$$

$$q'_{jpir} \le q_{jpi}$$

$$q'_{jpir} \le y_{jr}$$

$$q'_{jpir} \ge q_{jpi} - (١ - y_{jr})$$

$$m'_{spkc} \le m_{spk}$$

$$m'_{spkc} \le x_{kc}$$

$$m'_{spkc} \ge m_{spk} - (١ - x_{kc})$$

$$n''_{kpjr} \le n_{kpj}$$

$$n''_{kpjr} \le y_{jr}$$

$$n''_{kpjr} \ge n_{kpj} - (١ - y_{jr})$$

$$n'_{kpjcr} \le n''_{kpjr}$$

$$n'_{kpjcr} \le x_{kc}$$

$$n'_{kpjcr} \ge n''_{kpjr} - (١ - x_{kc})$$

$$٠ \le q', q, m, m', n, n', n'' \le ١$$

$$\theta_a, \theta_f, pa_{kc}, pf_{jr} \ge ٠$$

$$\eta, \eta', \eta'', \theta, \theta', \theta'', u, u', u'', v, v', v'' \ge ٠$$

$$x, y, z \in \{٠, ١\}$$

٤-٢همتای استوار مدل با رویکرد به شدت محافظه‌کارانه

در مساله برنامه‌ریزی خطی زیر اگر a شامل عدم قطعیت فاصله‌ای باشد؛ یعنی $a = [\underline{a}, \bar{a}]$ و $x \ge ٠$،

$$Min \quad c^T x \qquad (٦)$$

$$s.t.$$

$$a^T x \le b$$

$$x \ge ٠$$

همتای استوارآن برابر است با: [٩]

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

$$Min \quad c^T x \qquad (۷)$$
$$s.t.$$
$$\bar{a}^T x \le b$$
$$x \ge ۰$$

با توجه به مطالب ذکر شده همتای استوار مدل با رویکرد به شدت محافظه‌کارانه به صورت زیر است:

$$Min \quad \sum_{i=۱}^{۷} t_i \qquad (۸)$$

$$s.t.$$

$$\sum_k \sum_c \bar{a}_{kc} x_{kc} \le t_۱$$
$$\sum_j \sum_r \bar{f}_{jr} y_{jr} \le t_۲$$
$$\sum_k \sum_c \sum_p \sum_j \sum_r \bar{\alpha}_{jr} \bar{e}_{kp} n'_{kpjcr} \le t_۳$$
$$\sum_j \sum_p \sum_i \sum_r \bar{d}_{ip} \bar{\beta}_{jp} q'_{jpir} \le t_۴$$
$$\sum_k \sum_p \sum_j \sum_r \bar{\alpha}_{jr} \bar{b}_{kpj} n''_{kpjr} \le t_۵$$
$$\sum_j \sum_p \sum_i \bar{d}_{ip} \bar{c}_{jpi} q_{jpi} \le t_۶$$
$$\sum_s \sum_p \sum_k \sum_c \bar{w}_{kc} \bar{g}_{spk} m'_{spkc} \le t_۷$$
$$\sum_j q_{jpi} = ۱$$
$$\sum_c x_{kc} \le ۱$$
$$\sum_r y_{jr} \le ۱$$
$$\sum_k \sum_c x_{kc} \le X$$
$$\sum_j \sum_r y_{jr} \le Y$$
$$\sum_k \sum_p \sum_c \bar{w}_{kc} m'_{spkc} - \underline{\gamma}_s z_s \le ۰$$
$$\sum_i \bar{d}_{ip} q_{jpi} - \sum_k \sum_r \underline{\alpha}_{jr} n''_{kpjr} \le ۰$$
$$\sum_p \sum_j \sum_r \bar{\alpha}_{jr} n''_{kpjr} - \sum_c \underline{w}_{kc} x_{kc} \le ۰$$
$$\sum_i \sum_p \bar{d}_{ip} q_{jpi} - \sum_r \underline{\alpha}_{jr} y_{jr} \le ۰$$
$$\sum_j \sum_r \bar{\alpha}_{jr} n''_{kpjr} - \sum_s \sum_c \underline{w}_{kc} m_{spk} \le ۰$$

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

$$q'_{jpir} \le q_{jpi}$$
$$q'_{jpir} \le y_{jr}$$
$$q'_{jpir} \ge q_{jpi} - (1 - y_{jr})$$
$$m'_{spkc} \le m_{spk}$$
$$m'_{spkc} \le x_{kc}$$
$$m'_{spkc} \ge m_{spk} - (1 - x_{kc})$$
$$n''_{kpjr} \le n_{kpj}$$
$$n''_{kpjr} \le y_{jr}$$
$$n''_{kpjr} \ge n_{kpj} - (1 - y_{jr})$$
$$n'_{kpjcr} \le n''_{kpjr}$$
$$n'_{kpjcr} \le x_{kc}$$
$$n'_{kpjcr} \ge n''_{kpjr} - (1 - x_{kc})$$
$$0 \le q', q, m, m', n, n', n'' \le 1$$
$$x, y, z \in \{0, 1\}$$

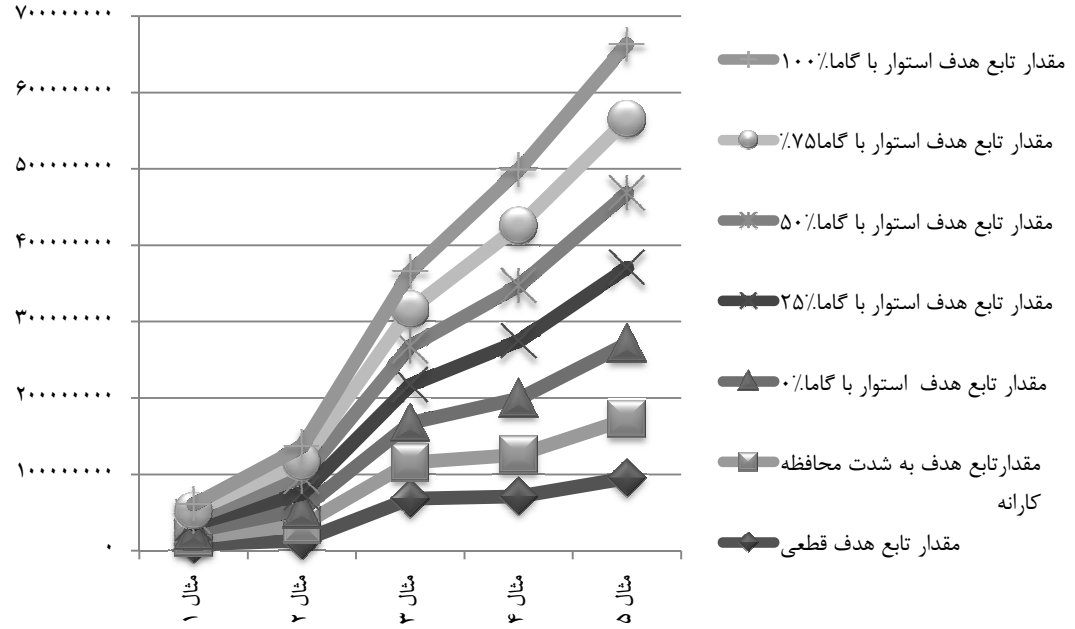
۵ مثال عددی و نتایج محاسباتی

به دلیل پیچیدگی بالای مدل از نظر تعداد متغیرها، محدودیت‌ها و داده‌ها، مدل در فضای مجموعه‌ها در نرم‌افزار CPLEX پیاده‌سازی شده است. پارامترهای غیرقطعی در بازه‌ای متقارن در نظر گرفته شده که به طور تصادفی تولید، اجرا و مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل با رویکرد محافظه‌کاری قابل کنترل باسطوح محافظه‌کاری متفاوت اجرا گردیده. مقایسه نتایج مدل‌های خطی و استوار در جدول (۴) و (۵) نشان داده شده است. برای حل مسایل از یک رایانه با پردازنده AMD A6-3400M APU با ۸GB حافظه رم استفاده گردیده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، زمان حل مدل با رویکرد محافظه‌کاری قابل کنترل بیشتر از زمان حل مدل قطعی و مدل با رویکرد به شدت محافظه‌کارانه است. همچنین از جدول (۴) و شکل (۱) استنباط می‌شود در حالت خطی و به شدت محافظه‌کارانه مدل از لحاظ عدم قطعیت محافظت نمی‌شود و مدل با رویکرد به شدت محافظه‌کارانه نسبت به مدل در حالت قطعی جواب‌های بدتری را نشان می‌دهد اما در حالت محافظه‌کاری قابل کنترل با تنظیم سطح حفاظت (عدم قطعیت موجود در مدل) مدل به دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌شود. با افزایش سطح حفاظت مقدار تابع هدف بدتر شده است (شکل ۱)، در واقع هر چه سطح حفاظت افزایش یافته است مدل مقادیر متغیرها را به نحو سختگیرانه‌تری در بازه مجاز انتخاب کرده و نهایتاً جواب تابع هدف، بدتر شده است که این به دلیل ویژگی‌های مدل‌سازی استوار می‌باشد.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

جدول٤. مقایسه مقادیر تابع هدف و درصد تغییرات از مدل خطی شده

مدل	خطی شده (قطعی)	به شدت محافظه کارانه	محافظه کاری قابل کنترل									
			Γ=٪۰		Γ=٪۲۵		Γ=٪ ۵۰		Γ=٪۷۵		Γ=٪۱۰۰	
ابعاد مساله S*P*K*C*J*R*I	مقدار تابع هدف	مقدار تابع هدف	درصد تغییرات	مقدار تابع هدف	درصد تغییرات	مقدار تابع هدف	درصد تغییرات	مقدار تابع هدف	درصد تغییرات	مقدار تابع هدف	درصد تغییرات	مقدار تابع هدف	درصد تغییرات
۳*۲*۲*۲*۱*۱	۸۱۹۱۵۴۴	۸۷۵۵۱۱۸	۶/۹	۸۵۶۰۹۳۲	۴/۵	۹۳۳۷۸۰۴	۱۴	۸۶۸۰۰۴۷	۶	۸۲۴۳۴۳۲	۰/۶	۸۵۶۰۹۳۲	۴/۵
٤*۲*٤*۲*۲*۲	۱۳۱۳۵۸۳۹	۲۰۸۷۴۵۲۲	۵۸/۹	۱۹۹۰۳۳۳۳	۵۱/۵	۲۰۷۴۶۶۱۵	۵۷/۹	۲۱۲۹۵۶۷۳	۶۲/۱	۱۹۷۰۳۲۰۲	۵۰	۲۰۵۷۶۴۷۸	۵۶/۶
۲*۳*۳*۳*٦*۳*۲	۶۸۱۲۳۶۸۶	۴۷۲۳۸۳۹۹	۳۰/۷	۵۱۵۸۱۶۴۷	۲۴/۳	۴۹۵۹۳۶۸۱	۲۷/۲	۵۰۶۷۱۹۲۹	۲۵/۶	۴۸۴۸۸۷۷۷	۲۸/۸	۴۹۳۷۲۹۸۰	۲۷/۵
۳*۳*٤*۳*۸*۳*۱۵	۷۱۰۹۴۴۱۰	۵۴۷۰۷۷۶۰	۲۳	۷۳۲۱۸۳۷۸	۳	۷۵۱۶۶۲۲۸	۵/۷	۷۲۳۱۰۴۱۱	۱/۷	۷۸۳۹۶۲۷۱	۱۰/۳	۷۳۴۶۸۳۱۴	۳/۳
۳*۳*۵*۳*۱۰*۳*۱۸	۹۵۱۵۰۸۷۵	۷۷۱۸۹۵۹۰	۱۸/۹	۹۸۸۷۰۴۴۶	۳/۹	۹۸۸۶۸۵۴۷	۳/۹	۹۷۶۹۵۷۶۴	۲/۷	۹۶۷۰۱۰۴۴	۱/۶	۹۷۹۵۰۸۷۳	۲/۹



شکل ۱. مقایسه مقادیر تابع هدف قطعی با دو رویکرد استوار(اولین مثال با اولین بعد جدول(۴) مطابقت دارد)

جدول ۵. مقایسه تعداد تکرار و زمان برای حل مدل

مدل	قطعی	به شدت محافظه کارانه	محافظه کاری قابل کنترل									
			Γ=٪۰		Γ=٪۲۵		Γ=٪ ۵۰		Γ=٪۷۵		Γ=٪۱۰۰	
ابعاد مساله S*P*K*C*J*R*I	تعداد تکرار	زمان حل (ثانیه)	تعداد تکرار	زمان حل (ثانیه)	تعداد تکرار	زمان حل (ثانیه)	تعداد تکرار	زمان حل (ثانیه)	تعداد تکرار	زمان حل (ثانیه)	تعداد تکرار	زمان حل (ثانیه)
۳*۲*۲*۲*۱*۱	۱۳	۴:۳۹	۲۶	۴:۳۹	۱۲۴	۵:۷۴	۹۷	۴:۹۱	۱۱۰	۵:۳۲	۱۲۰	۴:۶۵	۱۲۷	۵:۵۲
٤*۲*٤*۲*۲*۲	۱۱۲	۳:۷۹	۱۳۷	۴:۶۰	۲۳۵	۶:۶۹	۵۹۴	۵:۳۵	۴۸۲	۵:۹۲	۵۸۵	۴:۹۲	۵۲۲	۵:۴۱
۲*۳*۳*۳*٦*۳*۱۲	۲۹۹۱۹	۱۲:۱۸	۴۶۲۹	۱۱:۱۲	۲۹۲۵۲	۱۸:۲۴	۴۴۳۵۷	۲۶:۴۲	۷۴۱۰۳	۳۳:۶۷	۸۱۵۹۳	۳۳:۳۰	۶۶۳۰۶	۳۱:۱۱
۳*۳*٤*۳*۸*۳*۱۵	۲۳۵۲۶۵	۴۰:۱۶	۱۰۱۶۶	۱۹:۸۸	۱۱۵۹	۲۴:۳۵	۱۸۳۵۰	۳۹:۷۶	۱۵۰۲۳	۳۹:۲۱	۱۹۵۰۱	۴۲:۴۲	۲۳۴۵۶	۴۶:۸۲
۳*۳*۵*۳*۱۰*۳*۱۸	۱۲۶۶۵	۲۵:۶۲	۳۷۶۴۳	۴۸:۴۶	۲۷۶	۳۵:۹۹	۱۳۹۳۹	۶۷:۳۴	۱۶۸۸۸	۷۶:۳۲	۲۱۶۲۲	۷۴:۸۶	۲۸۶۳۱	۸۳:۳۶

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

٦ نتیجه و جمع بندی

در این مقاله، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی، عدد صحیح آمیخته، تخصیص- مکان‌یابی، چندمحصولی، چندمنبعی، چندمرحله‌ای، چندظرفیتی ارایه گردیده است. ازآنجایی که پارامترهای مدل عدم قطعیت داشته و پیش‌بینی شده است و یا به صورت ذهنی و قضاوتی در نظر گرفته می شوند؛ بنابراین مدل‌های استوار برای طراحی زنجیره‌ی تأمین -که در این مقاله با دو رویکرد رایج در برنامه‌ریزی استوار یعنی رویکرد محافظه‌کاری قابل کنترل و رویکرد به شدت محافظه‌کارانه- ارایه شده است تا بتواند این عدم قطعیت را پوشش داده؛ در عمل بهینگی زنجیره‌تأمین طراحی شده را در برابر تغییرات احتمالی مقادیر مدل در شرایط واقعی حفظ نماید. براساس نتایج به دست آمده، رویکرد محافظه‌کاری قابل کنترل در ازای سطوح مختلف محافظه‌کاری بیشتر، کاهش بیشتر مقدار تابع هدف را نشان می‌دهند که این موضوع بر اساس ویژگی‌های مدل محافظه‌کاری قابل کنترل قابل پیش‌بینی بود. در مساله هدف در نظر گرفته شده هزینه‌های سرمایه‌گذاری، پردازش و حمل و نقل و همچنین ریسک موجود در زنجیره‌تأمین را به حداقل می‌رساند. مساله با دو رویکرد روی پنج نمونه، با CPLEX 12.4 حل و بهترین جواب و زمان اجرا را مورد ارزیابی قرار داده است که نتایج در جدول (۴) و (۵) و شکل (۱) قابل مشاهده می‌باشد.

منابع

[۱۷] نجمی، ح.، ماکوئی، ا.، سید حسینی، س.م.، (۱۳۹۲). طراحی شبکه لجستیکی رو به جلو/ بازگشتی چند محصولی با استفاده از برنامه‌ریزی غیر خطی. مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، ۱۰(۳)، ۹-۱.

[۱۹] آذر، ع.، نجفی، ا.، نجفی، س.، (۱۳۹۰). مدلسازی ریاضی استوار، رویکردی نوین در بودجه ریاضی عمومی ایران.پژوهش‌های مدیریت در ایران، ۱۵(۲).

[1] Baghalian, A., Rezapour, S., Farahani, R.Z., (2012). Innovative Applications of OR: Robust Supply Chain Network Design with Service Level against Disruptions and Demand Uncertainties: A Real-Life Case. European Journal of Operational Research.227(1): 199-215.

[2] Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L., Paksoy, T., (2006). A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. Computers & Industrial Engineering. 51(1): 196-215.

[3] Tabrizi, B. H., Razmi, J., (2013). Introducing a mixed-integer non-linear fuzzy model for risk management in designing supply chain networks. Journal of Manufacturing Systems.32(2): 295-307.

[4] Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L., Karaoglan, I., (2009). A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design. Computers & Industrial Engineering. 56(2): 521-537.

[5] Santoso, T., Ahmed, A., Goetschalckx, M., Shapiro, A., (2005). A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. European Journal of Operational Research. 167(1): 96-115.

[6] Peidro, D., Mula, J., Jiménez, M., del Mar Botella, M., (2010). A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment. European Journal of Operational Research. 205(1): 65-80.

[7] Bogataj, D., Bogataj, M., (2007). Measuring the supply chain risk and vulnerability in frequency space. International Journal of Production Economics. 108(1): p. 291-301.

[8] Kar, A.K.,(2010).Risk in Supply Chain Management.

[9] Salahi, M., Fallahi, S., (2013). Linear fractional program under interval and ellipsoidal uncertainty. Kybernetika. 49(1): 181-187.

[10] Georgiadis, M.C., Tsiakis, P., Longinidis, P., Sofioglou, M.K., (2011).Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations. Omega. 39(3): p. 254-272.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[11] 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.
[12] You, F., Grossmann, I.E., (2008). Design of responsive supply chains under demand uncertainty. Computers & Chemical Engineering. 32(12): 3090-3111.
[13] Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q., (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. European Journal of Operational Research. 179(3): 1063-1077.
[14] Guillén, G., Mele, F. D., Bagajewicz, M. J., Espuna, A., Puigjaner, L., (2005). Multiobjective supply chain design under uncertainty. Chemical Engineering Science. 60(6): 1535-1553.
[15] Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Ziegler, H.-P., (2012). A multi-stage stochastic supply network design problem with financial decisions and risk management. Omega. 40(5): p. 511-524.
[16] Singh, A., Jain, R., Mishra, P., (2013). Capacities-based supply chain network design considering demand uncertainty using two-stage stochastic programming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-8.
[18] Bisschop, J., (2006). AIMMS-Optimization modeling. Lulu. com.
[20] Gabrel, V., Murat, C., Thiele, A., (2012). Recent advances in robust optimization and robustness: An overview. Working paper.
[21] Bertsimas, D., Sim, M., (2004). The price of robustness. Operations research. 52(1): 35-53.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]