

طراحی شبکه‌ی تأمین حلقه‌بسته با ریسک اشتراکی تحت شرایط عدم قطعیت

مریم صانعی (کارشناس ارشد)

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی صنایع، تهران

رضا توکلی‌مقدم* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، تابستان ۱۳۹۴
دوری ۱ - ۳۱، شماره ۱، ص. ۹۱-۸۱

در سال‌های اخیر طراحی شبکه‌های زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته مطابق فاکتورهای تجاری و محیطی مورد توجه قرار گرفته است. مدل پیشنهادی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین را رو به جلو و معکوس به صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد، همچنین برای جاوگیری از زیر بهینگی‌های ناشی از در نظر گرفتن زنجیره‌ی رو به جلو و معکوس به صورت جدا از هم، تصمیمات راهبردی همزمان با تصمیمات تاکتیکی شبکه طراحی می‌شود. تقاضای مشتریان غیرقطعی و با توزیع نرمال در نظر گرفته می‌شود. برای مواجهه با عدم قطعیت موجود در تقاضای مشتریان از راهکار ریسک اشتراکی استفاده می‌شود و سپس، عدم قطعیت در سایر پارامترهای مدل نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. برای حل مدل بهینه‌سازی احتمالی و استفاده از مزیت‌های مدل قطعی از روش فازی‌زدایی خیمینز استفاده می‌شود. مدل طراحی شده که یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی است، با استفاده از برنامه‌ی GAMS حل می‌شود.

واژگان کلیدی: طراحی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته، ریسک اشتراکی، برنامه‌ریزی ریاضی فازی.

maryam.saneil@gmail.com
tavakoli@ut.ac.ir

۱. مقدمه

براساس تعریف، زنجیره‌ی تأمین به تمامی فعالیت‌های مرتبط با جریان و مبادله‌ی کالاها و خدمات، از مرحله‌ی ماده‌ی خام اولیه تا مرحله‌ی محصول نهایی، که قابل مصرف مشتری است اطلاق می‌شود.^[۱] زنجیره‌ی تأمین تمامی بخش‌هایی را در بر می‌گیرد که مستقیم یا غیر مستقیم برای تأمین خواسته‌های مشتریان با هم در ارتباط‌اند. در سراسر دنیا مدیریت زنجیره‌ی تأمین یکی از مسائل اساسی پیش روی بنگاه‌های اقتصادی بزرگ است به طوری که تمامی فعالیت‌های سازمان را به منظور تولید محصولات، بهبود کیفیت، کاهش هزینه و ارائه‌ی خدمات مورد نیاز مشتریان تحت تأثیر قرار می‌دهد. از سوی دیگر الزامات قانونی، به خصوص شرایط زیست‌محیطی و نیز شرایط رقابت جهانی سازمان‌ها را ملزم به جمع‌آوری محصولات برگشتی خود کرده تا به احیاء، بازیافت یا انهدام این محصولات اقدام کنند. در همین راستا لجستیک معکوس در زنجیره‌های تأمین مورد توجه قرار گرفت. محققین لجستیک معکوس را «فرایند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل مؤثر و کارای جریان مواد اولیه، موجودی در جریان، محصولات نهایی و اطلاعات مرتبط با آن، از سوی مصرف کنندگان تا مبدأ اصلی آن با هدف کسب مجدد ارزش اقلام یا انهدام مناسب آنها» معرفی کردند.^[۲] آنها چهارگام مشترک برای تمامی سیستم‌های لجستیک معکوس برشمردند:

- جمع‌آوری^۱؛
- گزینش و انتخاب^۲؛
- مرتب‌سازی و طبقه‌بندی^۳؛
- توزیع به محل مناسب^۴.

در دهه‌های اخیر بسیاری از شرکت‌ها بر فعالیت‌های بازیافت و احیاء تمرکز کرده‌اند و موفقیت‌های قابل توجهی در این زمینه به دست آورده‌اند. در طراحی مدل‌های زنجیره‌ی تأمین معکوس، از مدل‌های معمول «برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط (MIP)^۵» استفاده می‌شود. این مدل‌ها از مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات بدون ظرفیت ساده، به مدل‌های چندمرحله‌ی یا چندمحصولی پیچیده مرتب می‌شوند و هدف آنها تعیین کم‌ترین هزینه‌ی طراحی سیستم است که به طور معمول شامل تعامل بین هزینه‌های ثابت باز کردن تسهیلات و هزینه‌های حمل‌ونقل است.^[۲] در نظر گرفتن شبکه‌ی رو به جلو همراه با لجستیک معکوس می‌تواند موجب پرهیز از زیربهینه‌گی و در نتیجه صرفه‌جویی اقتصادی شود. زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته مسائلی هستند که در آنها شبکه‌های رو به جلو و معکوس یکپارچه شده‌اند. طراحی شبکه‌های حلقه‌بسته به دلیل در نظر گرفتن همزمان پیکربندی معمول زنجیره‌ی تأمین رو به جلو و سیستم جریان بازگشتی مواد، مشکل‌تر از طراحی شبکه‌های رو به جلو و معکوس به صورت جداگانه است. در بیشتر کارهای گذشته طراحی شبکه تنها برای

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۶/۹، اصلاحیه ۱۳۹۲/۶/۳۱، پذیرش ۱۳۹۲/۱۱/۲۰.

لجستیک مستقیم و لجستیک معکوس صورت گرفته است و در تعداد اندکی از مطالعات به طراحی شبکه‌های یکپارچه‌ی مستقیم و معکوس پرداخته شده است. یکی از راه‌های مؤثر در کاهش سطح ذخیره‌ی احتیاطی و در نتیجه کاهش موجودی در جریان هم‌زمان با افزایش خدمت‌رسانی، ریسک اشتراکی است. ریسک اشتراکی از مفاهیم مهم زنجیره‌ی تأمین است و استفاده از آن برای تأمین تقاضاهایی با عدم قطعیت بالا بسیار مؤثر است. کاربرد استراتژی «ریسک اشتراکی» هنگامی مناسب است که هزینه‌های موجودی و انبارداری درصد بزرگی از هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین را در بر می‌گیرد.

با پیشنهاد مسئله‌ی ادغام موجودی و ریسک اشتراکی، به‌عنوان راهی برای تعادل بحرانی در کاهش هزینه‌ها و افزایش پاسخ‌گویی،^[۴] یک مدل بهینه‌سازی دومعیاره برای بیان مسئله‌ی ادغام موجودی تحت استراتژی ریسک اشتراکی ایجاد شد. برای حل این مدل نیز یک الگوریتم دومرحله‌ی ارائه شد که بهترین سیستم شبکه‌ی توزیع ممکن، متناسب با اهداف سازمان را تعیین می‌کند. محققین یک مدل مکان‌یابی ارائه کرده‌اند^[۵] که تقاضاهای آنلاین را به انبارهای منطقه‌ی ظرفیت‌دار در زنجیره تأمین چنددرجه‌ی تخصیص می‌دهد. مدل بسط داده شده تعامل بین اثر ریسک اشتراکی و هزینه‌های حمل‌ونقل در سیستم موجودی/لجستیک در دوره‌ی را مورد توجه قرار می‌داد. آنها مدل‌شان را به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی فرمول‌بندی، و یک الگوریتم آزادسازی لاگرانژ برای حل آن ارائه کردند.

محققین مدل MINLP را -- که تعیین‌کننده‌ی ساختار شبکه‌ی بهینه، حمل‌ونقل و سطح موجودی زنجیره‌ی تأمین چنددرجه‌ی، با در نظر گرفتن تقاضای غیرقطعی مشتریان است -- ارائه کردند.^[۶] در این مدل اثر ریسک اشتراکی بر روی محاسبات با ترکیب تقاضاها در گره‌های پایین دستی به گره‌های بالا دستی حاصل می‌شود.

پژوهش‌گران m محصول را با طراحی یک محصول پیمانه‌ی مشترک در مدل توزیع چنددرجه‌ی در نظر گرفته و یک بینش مدیریتی بر پایه‌ی اثر ریسک اشتراکی بر تقاضاهای غیرقطعی و واسطه‌ی محصول پیمانه‌ی ایجاد کردند.^[۷] آنان نشان داده‌اند که سطح موجودی بهینه برای دو محصول در جایگزینی کامل، وقتی که درآمد با موجودی اشتراکی افزایش یابد، ممکن است افزایش یا کاهش داشته باشد.^[۸]

بسیاری از تصمیم‌گیری‌های جهان واقعی در محیطی رخ می‌دهد که اهداف، محدودیت‌ها یا پارامترها به‌طور دقیق مشخص نیستند، و این منجر به افزایش علاقه‌مندی به استفاده از برنامه‌ریزی فازی و احتمالی می‌شود. بعضی از محققین مدل‌های احتمالی زنجیره‌ی تأمین را که به شرایط واقعی نزدیک‌ترند، پیشنهاد داده‌اند. بیشتر تحقیقات عدم قطعیت در زنجیره‌ی تأمین با استفاده از توابع توزیعی مدل شده‌اند که معمولاً از داده‌های تجربی به دست می‌آیند. مدل‌های احتمالی برای زمانی که داده‌ها غیرواقعی‌اند یا در دسترس نیستند، بهترین گزینه نیستند.^[۹] نظریه‌ی مجموعه‌ی فازی گزینه‌ی مناسبی برای مقابله با عدم قطعیت است.

در خصوص برنامه‌ریزی یکپارچه، به‌طور هم‌زمان مسئله‌ی چندمحصولی، چنددرجه‌ی و چندسطحی با پارامترهای فازی مد نظر قرار گرفت^[۱۰] و روش حلی ارائه شد که قادر به محاسبه‌ی مقدار هدف فازی مدل زنجیره‌ی تأمین است. مطالعه‌ی جدیدترین نمونه‌های برنامه‌ریزی فازی در مدل‌سازی برنامه‌ریزی یکپارچه‌ی اصلی در مسئله زنجیره‌ی تأمین^[۱۱] موجب شناخت یک مدل MILP چندهدفه شد که برنامه‌ریزی اصلی زنجیره‌ی تأمین را ممکن می‌سازد. در ادامه، یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه‌ی فازی ارائه شد^[۱۲] که هم‌زمان مجموع هزینه‌ها و مجموع زمان‌های ارسال را با توجه به سطوح موجودی، ظرفیت ماشین و نیروی کار موجود در هر منبع به‌اضافه‌ی تقاضای جاری و فضای موجود در دسترس در هر مقصد

و محدودیت‌های بودجه‌ی کل را کمینه می‌کند. همچنین دو رویکرد برنامه‌ریزی فازی مختلف برای حل مسئله‌ی زنجیره‌ی تأمین در صنعت اتومبیل مطرح شده است.^[۱۳]

محققین دیگری در ادامه، مسئله‌ی واقعی تولید و حمل و نقل را در رابطه با تولیدکننده از طریق برنامه‌ریزی ریاضی قطعی مد نظر قرار دادند که هزینه‌ها را با توجه به ظرفیت و تقاضا کمینه می‌کند.^[۱۴] سپس آنان یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی را ایجاد کردند و سرانجام یک طرح کلی برای تخصیص هزینه و سود بر مبنای نظریه‌ی فازی ارائه کردند.^[۱۵] برای دست‌یابی به عملکرد ارسال قابل قبول با متحمل شدن کم‌ترین هزینه و با توجه به عدم قطعیت‌های تقاضای مشتری، ارسال‌های زنجیره‌ی تأمین و عرضه، یک مدل ابتکاری بر مبنای نظریه‌ی فازی برای تعیین مقدار سفارش برای هر موجودی توسعه داده شد. همچنین یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوهدفه‌ی فازی برای زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته ارائه شد^[۱۶] که بر کمینه‌سازی هزینه‌ی کل و کمینه‌سازی تأخیر زمان تحویل متمرکز بود و حل آن با استفاده از دو رویکرد ابتکاری صورت می‌گرفت.

۲. تعریف مسئله

در این نوشتار مدل‌سازی یک زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته تحت شرایط عدم قطعیت، با در نظر گرفتن استراتژی ریسک اشتراکی بررسی می‌شود. این زنجیره در قسمت رو به جلو شامل سه سطح عرضه‌کننده، مراکز توزیع و مشتریان است؛ در زنجیره‌ی معکوس نیز مراکز جمع‌آوری، مراکز احیاء، مراکز بازیافت و مشتریان مواد را شامل می‌شود. محصولات از کارخانه‌ها به مراکز توزیع منتقل و از مراکز توزیع به مشتریان تحویل می‌شود. سپس محصولات از مشتریان جمع‌آوری شده و پس از بررسی با توجه به کیفیت، تعدادی از آنها به مراکز احیاء منتقل می‌شود و پس از تغییرات لازم مجدداً به سیستم توزیع بازمی‌گردد. تعداد دیگری از محصولات به مراکز بازیافت منتقل می‌شود و پس از جداسازی بین مشتریان مواد اولیه توزیع خواهد شد. هر کارخانه با ظرفیت محدود، از مراکز توزیع برای تحقق تقاضای مشتریان استفاده می‌کند. مسئله‌ی مورد بررسی تک‌محصولی است و تخصیص مراکز توزیع به عرضه‌کننده‌ها و نیز تخصیص مشتریان به مراکز توزیع به‌صورت تکی است. تقاضای مشتریان غیرقطعی و دارای توزیع نرمال با میانگین μ و واریانس ν است و میانگین تقاضای مشتریان برآورد می‌شود. از ذخیره‌ی احتیاطی برای پاسخ‌گویی به تغییرپذیری تقاضاهای مشتریان به‌منظور دست‌یابی به منافع ریسک اشتراکی در مراکز توزیع استفاده می‌شود. هدف این مدل، تعیین تعداد مراکز توزیع افتتاح شده و مکان آنها، تعیین تعداد مراکز جمع‌آوری، تعیین تعداد مراکز بازیافت و احیاء، و نیز تصمیمات کنترل موجودی راجع به میزان سفارش بهینه، سطح سفارش بهینه و مقدار ذخیره‌ی احتیاطی، میزان محصولات بازیافتی و نهایتاً تعیین کم‌ترین هزینه‌ی کل در شرایط عدم قطعیت تقاضا و با در نظر گرفتن ریسک اشتراکی است. در مرحله‌ی بعد، علاوه بر عدم قطعیت موجود در تقاضا، عدم قطعیت در هزینه‌های بازگشت و حمل و نقل بین تسهیلات و همچنین تقاضای مشتریان مواد مد نظر قرار می‌گیرد و از رویکرد برنامه‌ریزی فازی برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها و ریسک‌های ناشی از آنها استفاده می‌شود. در مدل ارائه شده چهار فرضیه وجود دارد:

۱. هر مرکز توزیع از سیاست (r, q) استفاده می‌کند.

۲. در مسیر رو به جلو، محصولات براساس سازوکار کششی به مشتریان تحویل می‌شود.

۳. در مسیر معکوس، محصولات براساس سازوکار فشاری به مراکز تحویل می‌شود. همچنین در مراکز باز یافت محصولات با سازوکار کششی به مشتریان مواد تحویل می‌شوند.
۴. تمامی محصولات برگشتی از مشتریان باید جمع‌آوری شود.

\widetilde{h}_{jt} : هزینه نگهداری موجودی هر واحد در مرکز توزیع j در بازه زمانی t ؛
 μ_k : میانگین تقاضای روزانه مشتری در مشتری k ؛
 ν_k : واریانس تقاضای روزانه مشتری در مشتری k ؛
 l_{ij} : زمان انتظار سفارش از عرضه‌کننده i به مرکز توزیع j .

۳.۳. متغیرهای تصمیم

۱.۳.۳. متغیرهای پیوسته

O_{ijt} : مقداری از محصولات که از کارخانه i به مرکز توزیع j در زمان t حمل می‌شود؛
 u_{jkt} : مقداری از محصولات که از مرکز توزیع j به مشتری k در زمان t حمل می‌شود؛
 q_{klt} : مقداری از محصولات برگشتی از مشتری k به مرکز جمع‌آوری l در دوره t ؛
 p_{lmt} : مقداری از محصولات قابل باز یافت که از مرکز جمع‌آوری l به مرکز احیاء m در دوره t حمل می‌شود؛
 s_{int} : مقداری از محصولات اوراقی که از مرکز جمع‌آوری l به مرکز باز یافت n در دوره t منتقل می‌شود؛
 h_{mjt} : مقداری از محصولات قابل احیاء که از مرکز احیاء m به مرکز توزیع j در دوره t حمل می‌شود؛
 ν_{net} : مقداری از محصولات قابل باز یافت از مرکز باز یافت n به مشتریان مواد e در دوره t حمل می‌شود.

۲.۳.۳. متغیرهای باینری

z_i : اگر عرضه‌کننده i باز باشد معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر؛
 x_j : اگر مرکز توزیع j باز باشد معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر؛
 y_l : اگر مرکز جمع‌آوری l باز باشد معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر؛
 f_m : اگر مرکز احیاء m باز باشد معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر؛
 w_n : اگر مرکز باز یافت n باز باشد معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر؛
 α_{jk} : اگر خرده‌فروش k به مرکز توزیع j اختصاص یافته باشد معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر؛
 β_{ij} : اگر مرکز توزیع j به عرضه‌کننده i تخصیص یافته باشد معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر؛
 γ_{mj} : اگر مرکز احیاء m به مرکز توزیع j اختصاص یابد معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر.

۴. مدل ریاضی پیشنهادی

تابع هدف این مدل شامل موارد زیر است:

۱. مجموع هزینه‌های احداث کارخانه‌ها، مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری، مراکز احیاء و مراکز باز یافت با یک سطح ظرفیت معین عبارت خواهد بود از:

$$\sum_i \widetilde{u}u_i z_i + \sum_j \widetilde{f}f_j x_j + \sum_l \widetilde{g}g_l y_l + \sum_m \widetilde{b}_m f_m + \sum_n \widetilde{a}_n w_n$$

۲. مجموع هزینه‌های حمل محصول از کارخانه‌ها به مراکز توزیع، از مراکز توزیع به مشتریان، از مشتریان به مراکز جمع‌آوری، از مراکز جمع‌آوری به مراکز احیاء، از مراکز جمع‌آوری به مراکز باز یافت، از مراکز احیاء به مراکز توزیع، از مراکز باز یافت

۳. مجموعه‌ها و پارامترهای ورودی مدل

۱.۳. مجموعه‌ها

i : اندیس مکان‌های داوطلب برای کارخانه (مراکز عرضه‌کننده)؛
 j : اندیس مکان‌های داوطلب برای مراکز توزیع؛
 k : اندیس مکان‌های ثابت برای خرده‌فروشان؛
 l : اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز جمع‌آوری؛
 m : اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز احیاء؛
 n : اندیس مکان‌های کاندید برای مراکز باز یافت؛
 e : اندیس مکان‌های ثابت برای مشتریان مواد؛
 t : دوره زمانی.

۲.۳. پارامترها

\widetilde{T}_{kt} : مقدار بازگشت از مشتری k در دوره t ؛
 \widetilde{C}_{et} : تقاضای مشتریان مواد e در دوره t ؛
 $\widetilde{\eta}_t$: میانگین کسر اوراقی در دوره t ؛
 $\widetilde{u}u_i$: هزینه ثابت بازکردن کارخانه i ؛
 $\widetilde{f}f_j$: هزینه ثابت بازکردن مرکز توزیع j ؛
 $\widetilde{g}g_l$: هزینه ثابت بازکردن مرکز جمع‌آوری l ؛
 \widetilde{b}_m : هزینه ثابت بازکردن مرکز احیاء m ؛
 \widetilde{a}_n : هزینه ثابت بازکردن مرکز باز یافت n ؛
 $\widetilde{c}o_{ij}$: هزینه حمل هر واحد محصول از کارخانه i به مرکز توزیع j ؛
 $\widetilde{c}u_{jkl}$: هزینه حمل هر واحد محصول از مرکز توزیع j به مشتری k ؛
 $\widetilde{c}q_{kl}$: هزینه حمل هر واحد محصول از مشتری k به مرکز جمع‌آوری l ؛
 $\widetilde{c}p_{lm}$: هزینه حمل هر واحد محصول از مرکز جمع‌آوری l به مرکز احیاء m ؛
 $\widetilde{c}s_{ln}$: هزینه حمل هر واحد محصول از مرکز جمع‌آوری l به مرکز باز یافت n ؛
 $\widetilde{c}h_{mj}$: هزینه حمل هر واحد محصول از مرکز احیاء m به مرکز توزیع j ؛
 $\widetilde{c}v_{ne}$: هزینه حمل هر واحد محصول از مرکز باز یافت n به مشتری مواد e ؛
 \widetilde{p}_i : هزینه ساخت هر واحد از محصول در کارخانه i ؛
 $\widetilde{\varphi}_j$: هزینه پردازش هر واحد از محصول در مرکز توزیع j ؛
 \widetilde{B}_l : هزینه پردازش هر واحد از محصول در مرکز جمع‌آوری l ؛
 \widetilde{T}_m : هزینه بازسازی هر واحد از محصول در مرکز احیاء m ؛
 $\widetilde{\theta}_n$: هزینه باز یافت هر واحد از محصول در مرکز باز یافت n ؛
 $\widetilde{p}p_i$: حداکثر ظرفیت کارخانه i در هر دوره؛
 $\widetilde{p}x_j$: حداکثر ظرفیت مرکز توزیع j در هر دوره؛
 $\widetilde{p}y_l$: حداکثر ظرفیت مرکز جمع‌آوری l در هر دوره؛
 $\widetilde{p}z_m$: حداکثر ظرفیت مرکز احیاء m در هر دوره؛
 $\widetilde{p}w_n$: حداکثر ظرفیت مرکز باز یافت n در هر دوره؛
 \widetilde{A}_j : هزینه ثابت سفارش موجودی در مرکز توزیع j ؛

به مشتریان مواد عبارت خواهد بود از:

$$\begin{aligned} & \sum_t \sum_i \sum_j \widetilde{c}o_{ij} o_{ijt} + \sum_t \sum_j \sum_k \widetilde{c}u_{jk} u_{jkt} \\ & + \sum_t \sum_k \sum_l \widetilde{c}q_{kl} q_{klt} + \sum_t \sum_l \sum_m \widetilde{c}p_{lm} p_{lmt} \\ & + \sum_t \sum_l \sum_n \widetilde{c}s_{ln} s_{lnt} + \sum_t \sum_i \sum_j \widetilde{c}h_{mj} h_{mjt} \gamma_{mj} \\ & + \sum_t \sum_n \sum_e \widetilde{c}v_{ne} v_{net} \end{aligned}$$

۳. مجموع هزینه‌های ساخت محصول در کارخانه، پردازش محصول در مراکز توزیع، پردازش محصول در مراکز توزیع، بازسازی محصول در مراکز احیاء، تفکیک محصول در مراکز بازیافت، عبارت است از:

$$\begin{aligned} & \sum_t \sum_i \sum_j \widetilde{p}_i o_{ijt} + \sum_t \sum_j \sum_k \widetilde{\varphi}_j u_{jkt} \\ & + \sum_t \sum_k \sum_l \widetilde{B}_l p_{lmt} + \sum_t \sum_l \sum_n \widetilde{B}_l s_{lnt} \\ & + \sum_t \sum_l \sum_n \widetilde{r}_m h_{mjt} \gamma_{mj} + \sum_t \sum_n \sum_e \widetilde{\theta}_n v_{net} \end{aligned}$$

۴. فرض کنید D_j ، Γ_j و L_j میانگین و واریانس تقاضای روزانه و زمان انتظار سفارش در مرکز توزیع j باشند. آنگاه تقاضای مرکز توزیع j دارای توزیع نرمال با میانگین $\sum_k \mu_{kt} \alpha_{jk}$ و واریانس $\sum_k \nu_{kt} \alpha_{jk}$ است، زیرا تقاضاهای مشتریان دارای توزیع نرمال و مستقل است. به‌طور مشابه، زمان انتظار سفارش در هر مرکز توزیع برابر است با: $L_j = \sum_i l_{ij} \beta_{ij}$. تقاضا در مرکز توزیع j در طی زمان انتظار دارای توزیع نرمال با میانگین $D_j \Gamma_j$ و واریانس $L_j \Gamma_j$ است. با توجه به این که هر مرکز توزیع از سیاست کنترلی (r, Q) استفاده می‌کند -- یعنی اگر سطح موجودی کم‌تر از r شود مقدار Q از محصول سفارش داده می‌شود -- از رویه‌ی تخمین میزان سفارش اقتصادی برای حل بهینه‌ی سیاست (r, Q) در این تحقیق استفاده شده است. برای به دست آوردن هزینه موجودی بهینه، مقدار سفارش بهینه، و سطح ذخیره‌ی احتیاطی به دست می‌آید. مقدار سفارش بهینه در هر مرکز توزیع چنین محاسبه می‌شود:

$$Q_j^* = \sqrt{2A_j \chi \sum_k \mu_{kt} \alpha_{jk} / h h_{jt}}$$

علاوه بر آن، سطح بهینه‌ی سفارش مجدد و سطح ذخیره‌ی احتیاطی در هر مرکز توزیع را می‌توان چنین به دست آورد:

$$r_j = \sum_k \mu_{kt} \alpha_{jk} \sum_j l_{ij} \beta_{ji} + z_\alpha \sqrt{\sum_i \sum_k \nu_{kt} l_{ij} \alpha_{jk} \beta_{ji}}$$

$$ss_j = \sqrt{\sum_i \sum_k \nu_{kt} l_{ij} \alpha_{jk} \beta_{ji}}$$

که در آن α نشان‌گر «سطح خدمت‌رسانی» است؛ به این معنا که مقدار کمبود تأمین‌کننده در طی زمان انتظار با احتمال کم‌تر یا مساوی α رخ می‌دهد و z_α انحراف معیار استاندارد است به طوری که $p(Z \leq z_\alpha) = \alpha$ مثلاً $z_{0.25} = 0.674$ بدین معناست که زمان انتظار تقاضاها با احتمال ۹۷/۵٪ ارضاء شده است و $z_{0.99} = 2.33$. تابع هزینه‌ی موجودی بهینه در هر مرکز توزیع با عبارت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} c_j^{INV} &= \sqrt{2A_j h h_{jt} \chi \sum_i \mu_{kt} \alpha_{jk}} \\ &+ z_\alpha h h_{jt} \sqrt{\sum_i \sum_k \nu_{kt} l_{ij} \alpha_{jk} \beta_{ji}} \end{aligned}$$

که جمله‌ی اول آن معرف میزان موجودی در دسترس، و جمله‌ی دوم معرف میزان ذخیره‌ی احتیاطی است. این رابطه نشان‌گر تأثیر ریسک اشتراکی با متمرکز کردن ذخیره‌ی احتیاطی در مراکز توزیع است؛ به عبارتی با کسب مقادیر بهینه‌ی موجودی در دسترس و موجودی احتیاطی به هدف کاهش هزینه‌های ناشی از نگهداری موجودی دست خواهیم یافت. استراتژی ریسک اشتراکی ذخیره‌ی احتیاطی وقتی که مراکز توزیع به صورت متمرکز هستند، موجب کاهش هزینه‌های موجودی و بالا بردن مقداری از سطح خدمت‌رسانی، به‌ویژه در شرایطی که تقاضاها خیلی متفاوت‌اند، خواهد شد.^[۱۷]

$$\begin{aligned} \text{Min } w_1 &= \sum_i \widetilde{u}_i z_i + \sum_j \widetilde{f}_j x_j + \sum_l \widetilde{g}_l y_l + \sum_m \widetilde{b}_m f_m \\ &+ \sum_n \widetilde{a}_n w_n + \sum_t \sum_i \sum_j (\widetilde{c}o_{ij} + \widetilde{p}_i) o_{ijt} \\ &+ \sum_t \sum_j \sum_k (\widetilde{c}u_{ij} + \widetilde{\varphi}_j) u_{jkt} \\ &+ \sum_t \sum_k \sum_l \widetilde{c}q_{kl} q_{klt} \\ &+ \sum_t \sum_l \sum_m (\widetilde{c}p_{lm} + \widetilde{B}_l) p_{lmt} \\ &+ \sum_t \sum_l \sum_n (\widetilde{c}s_{ln} + \widetilde{B}_l) s_{lnt} \\ &+ \sum_t \sum_j \sum_k (\widetilde{c}h_{mj} + \widetilde{r}_m) h_{mjt} \gamma_{mj} \\ &+ \sum_t \sum_n \sum_e (\widetilde{c}v_{ne} + \widetilde{\theta}_n) v_{net} \\ &+ \sum_t \sum_j \sqrt{2A_j h h_{jt} \chi \sum_k \mu_{kt} \alpha_{jk}} \\ &+ \sum_t \sum_j z_\alpha h h_{jt} \sqrt{\sum_i \sum_k \nu_{kt} l_{ij} \alpha_{jk} \beta_{ji}} \end{aligned}$$

$$\sum_j u_{jkt} * \alpha_{jk} \geq \mu_{kt} \quad \forall k, t \quad (1)$$

$$\sum_n v_{net} \geq \widetilde{c}_{et} \quad \forall e, t \quad (2)$$

$$\sum_l q_{klt} \geq \widetilde{r}_{kt} \quad \forall k, t \quad (3)$$

$$\widetilde{\eta}_t \sum_k q_{klt} = \sum_m p_{lmt} \quad \forall l, t \quad (4)$$

$$(1 - \widetilde{\eta}_t) \sum_k q_{klt} = \sum_m p_{lmt} \quad \forall l, t \quad (5)$$

$$\sum_j h_{mjt} = \sum_l p_{lmt} \quad \forall m, t \quad (6)$$

$$\sum_e v_{net} \leq \sum_l s_{lnt} \quad \forall n, t \quad (7)$$

$$\sum_i o_{ijt} + \sum_m h_{mjt} = \sum_k u_{jkt} \quad \forall j, t \quad (8)$$

$$\sum_j o_{ijt} \leq z_i \widetilde{p}_i \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$\sum_k \mu_{kt} \alpha_{jk} + \sum_m h_{mjt} \gamma_{mj} \leq x_j \widetilde{p}_j \quad \forall j, t \quad (10)$$

$$\sum_k q_{klt} \leq y_l \widetilde{p}_l \quad \forall l, t \quad (11)$$

$$\sum_l p_{lmt} \leq f_m \widetilde{p}_m \quad \forall m, t \quad (12)$$

$$\sum_l s_{lnt} \leq w_n \widetilde{p}_n \quad \forall n, t \quad (13)$$

$$\sum_i \beta_{ij} \leq x_j \quad \forall j \quad (14)$$

$$\sum_j \alpha_{jk} = 1 \quad \forall k \quad (15)$$

$$\alpha_{jk} \leq \sum_i \beta_{ij} \quad \forall j, k \quad (16)$$

همچنین در جمله‌ی آخر تابع هدف مدل، جمله‌ی غیرخطی حاصل ضرب دو متغیر باینری را داریم. برای خطی کردن ضرب دو متغیر باینری می‌توان یک متغیر باینری جدید تعریف کرد طوری که:

$$\delta = \alpha * \beta$$

$$\delta \in \{0, 1\}$$

این حاصل ضرب سه محدودیت جدید زیر را به مدل اضافه می‌کند.

$$\alpha + \beta - \delta \leq 1$$

$$\delta \leq \alpha$$

$$\delta \leq \beta$$

با توجه به مطالب ذکر شده درخصوص ضرب دو متغیر باینری و نیز ضرب یک متغیر باینری در یک متغیر صحیح پیوسته، متغیرهای زیر را تعریف می‌کنیم:

$$\alpha \setminus jkt = u_{jkt} \alpha_{jk} \quad \forall j, k, t$$

$$\pi_{mjt} = h_{mjt} \gamma_{mj} \quad \forall m, j, t$$

$$\delta_{ijk} = \alpha_{jk} * \beta_{ij} \quad \forall i, j, k$$

که در آن $\alpha \setminus jkt$ و π_{mjt} متغیرهای مثبت پیوسته‌اند و δ_{ijk} یک متغیر باینری است. با توجه به مطالب بیان شده، تابع هدف مدل عبارت خواهد بود از:

$$\begin{aligned} \text{Min } w_1 = & \sum_i \widetilde{u}_i z_i + \sum_j \widetilde{f}_j x_j + \sum_l \widetilde{g}_l y_l + \sum_m \widetilde{b}_m f_m \\ & + \sum_n \widetilde{a}_n w_n + \sum_t \sum_i \sum_j (\widetilde{c}o_{ij} + \widetilde{p}_i) o_{ijt} \\ & + \sum_t \sum_j \sum_k (\widetilde{c}u_{ij} + \widetilde{\varphi}_j) u_{jkt} \\ & + \sum_t \sum_k \sum_l \widetilde{c}q_{kl} q_{klt} \\ & + \sum_t \sum_l \sum_m (\widetilde{c}p_{lm} + \widetilde{B}_l) p_{lmt} \\ & + \sum_t \sum_l \sum_n (\widetilde{c}s_{ln} + \widetilde{B}_l) s_{lnt} \\ & + \sum_t \sum_j \sum_k (\widetilde{c}h_{mj} + \widetilde{\tau}_m) \pi_{mjt} \\ & + \sum_t \sum_n \sum_e (\widetilde{c}v_{ne} + \widetilde{\theta}_e) v_{net} \\ & + \sum_t \sum_j \sqrt{2A_j h \widetilde{h}_{jt} \chi_t} \sum_k \mu_{kt} \alpha_{jk} \\ & + \sum_t \sum_j z_\alpha \widetilde{h}_{jt} \sqrt{\sum_i \sum_k v_{kt} l_{ij} \delta_{ijk}} \end{aligned}$$

همچنین محدودیت‌های ۱ و ۱۰ به ترتیب به محدودیت‌های ۱' و ۱۰' تبدیل می‌شوند و محدودیت‌های ۲۲ تا ۳۰ نیز به مدل اضافه می‌شود:

$$\sum_j \alpha \setminus jkt \geq \mu_{kt} \quad \forall k, t \quad (1')$$

$$\sum_k \mu_{kt} \alpha_{jk} + \sum_m \pi_{mjt} \leq x_j \widetilde{p}_j \quad \forall j, t \quad (10')$$

$$\alpha_{jk} + \beta_{ij} - \delta_{ijk} \leq 1 \quad \forall i, j, k \quad (22)$$

$$\delta_{ijk} \leq \alpha_{jk} \quad \forall i, j, k \quad (23)$$

$$\delta_{ijk} \leq \beta_{ij} \quad \forall i, j, k \quad (24)$$

$$\alpha \setminus jkt - M \alpha_{jk} \leq 0 \quad \forall i, j, k \quad (25)$$

$$-u_{jkt} + \alpha_{jk} \leq 0 \quad \forall i, j, k \quad (26)$$

$$\beta_{ij} \leq z_i \quad \forall i, j \quad (17)$$

$$\sum_m \gamma_{mj} = x_j \quad \forall j \quad (18)$$

$$\sum_j \gamma_{mj} = f_m \quad \forall m \quad (19)$$

$$z_i, x_j, y_l, f_m, w_n, \alpha_{jk}, \beta_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, l, m, n, k \quad (20)$$

$$\begin{aligned} o_{ijt}, u_{jkt}, q_{klt}, p_{lmt}, s_{lnt}, h_{mjt}, v_{net} \geq 0 \\ \forall i, j, l, m, n, k, e, t \quad (21) \end{aligned}$$

محدودیت ۱ نشان می‌دهد که میانگین تقاضای مشتریان برآورده می‌شود. محدودیت ۲ نشان می‌دهد که تقاضای مشتریان مواد برآورده می‌شود. محدودیت ۳ نشان می‌دهد که تمامی محصولات برگشتی از مشتریان جمع‌آوری می‌شود. محدودیت‌های ۴ تا ۸ جریان متعادل توزیع در مراکز جمع‌آوری، بازیافت و احیاء را نشان می‌دهند. محدودیت‌های ۹ تا ۱۳ به ترتیب مربوط به ظرفیت توزیع‌کنندگان، تأمین‌کنندگان مراکز جمع‌آوری، مراکز احیاء و مراکز بازیافت هستند. محدودیت ۱۴ نشان می‌دهد که اگر مرکز توزیع j باز باشد آیا به تولیدکننده i تخصیص یافته است یا خیر؛ به عبارتی این محدودیت برای تخصیص تکی هر تولیدکننده به کار می‌رود به صورتی که هر توزیع‌کننده در صورت باز بودن تنها از یک تولیدکننده خدمات دریافت کند. محدودیت ۱۵ نشان‌گر رابطه‌ی تک‌منبعی برای هر مشتری است. محدودیت ۱۶ نشان می‌دهد که هر مشتری فقط در صورتی می‌تواند از یک مرکز توزیع خدمت بگیرد که آن مرکز توزیع دست کم از یک تولیدکننده خدمت گرفته باشد. محدودیت ۱۷ نشان می‌دهد که مرکز توزیع j در صورتی می‌تواند از تولیدکننده i خدمت دریافت کند که تولیدکننده‌ی i باز باشد. محدودیت ۱۸ و ۱۹ برای تضمین بسته‌بودن زنجیره بیان شده است به این صورت که اگر مرکز توزیعی باز باشد حتماً از طرف یک مرکز احیاء سرویس‌دهی می‌شود. محدودیت ۲۰ مربوط به متغیرهای باینری در نظر گرفته شده در مدل و محدودیت ۲۱ مربوط به نوع متغیرهای پیوسته‌ی مدل است.

۵. خطی سازی محدودیت‌های غیرخطی

در مدل مذکور مشاهده می‌شود که محدودیت‌های ۱ و ۱۰ غیرخطی‌اند. برای خطی سازی این محدودیت‌ها از روش خطی کردن مدل غیرخطی حاصل ضرب یک متغیر باینری در یک متغیر صحیح پیوسته استفاده می‌شود. براساس این روش، اگر x یک متغیر صحیح پیوسته و π یک متغیر باینری باشد، آنگاه $y = x\pi$ ، که در آن y یک متغیر پیوسته است. سپس شروط منطقی:

$$\text{If } \pi = 0 \rightarrow y = 0$$

$$\text{If } \pi = 1 \rightarrow y = x$$

را برقرار می‌کنیم که این شروط معادل سه محدودیت زیر هستند:

$$y - M\pi \leq 0$$

$$-x + y \leq 0$$

$$x - y + M\pi \leq M$$

که در آنها M حد بالای x و y است.

استفاده می‌شود. روش خیمینز مبتنی است بر تعریف «مقدار مورد انتظار» و «بازه مورد انتظار» از اعداد فازی تعریف می‌شود. فرض کنید که \tilde{c} یک عدد فازی مثلثی باشد. معادله‌ی زیر را می‌توان به‌عنوان تابع عضویت \tilde{c} تعریف کرد.

$$\mu_{\tilde{c}}(x) = \begin{cases} f_c(x) = \frac{x-c^p}{c^m-c^p} & \text{If } c^p \leq x \leq c^m \\ 1 & \text{If } x = c^m \\ g_c(x) = \frac{c^o-x}{c^o-c^m} & \text{If } c^m \leq x \leq c^o \\ 0 & \text{If } x \geq c^o \text{ Or } x \leq c^p \end{cases}$$

برای تضمین وجود معکوس برای توابع $f_c(x)$ و $g_c(x)$ ، فرض می‌شود $f_c(x)$ پیوسته و صعودی و $g_c(x)$ پیوسته و نزولی باشد. طبق روش خیمینز^[۱۸] بازه انتظاری (EV) و مقدار انتظاری (EV) از عدد فازی مثلثی \tilde{c} چنین تعریف می‌شود:

$$EI(\tilde{c}) = [E_1^c, E_2^c] = \left(\int_0^1 f_c^{-1}(x) dx, \int_0^1 g_c^{-1}(x) dx \right) \\ = \left(\frac{1}{3}(c^p + c^m), \frac{1}{3}(c^m + c^o) \right) \\ EV(\tilde{c}) = \frac{E_1^c + E_2^c}{2} = \frac{c^p + 2c^m + c^o}{4}$$

در اینجا باید توجه داشت که برای عدد فازی دوزنقه‌ی می‌توان از معادلات یکسانی بهره جست. علاوه بر آن مطابق روش رتبه‌بندی خیمینز^[۱۸] برای هر جفت از اعداد فازی \tilde{a} و \tilde{b} ، درجه‌ی \tilde{a} بزرگ‌تر از \tilde{b} باشد چنین تعریف می‌شود:

$$\mu_m(\tilde{a}, \tilde{b}) = \begin{cases} 0 & \text{if } E_1^a - E_1^b \leq 0 \\ \frac{E_1^a - E_1^b}{E_1^a - E_1^b - (E_2^a - E_2^b)} & \text{if } 0 \in [E_1^a - E_1^b, E_2^a - E_2^b] \\ 1 & \text{if } E_2^a - E_2^b \geq 0 \end{cases} \quad (31)$$

هنگامی که $(\tilde{a}, \tilde{b}) \leq \alpha'' \mu_M$ باشد، گفته می‌شود که \tilde{a} در کم‌ترین درجه α'' بزرگ‌تر یا مساوی \tilde{b} است، و با $\tilde{a} \leq_{\alpha''} \tilde{b}$ نشان داده می‌شود. همچنین مطابق تعریف معادلات فازی^[۱۸] برای هر جفت از اعداد فازی \tilde{a} و \tilde{b} گفته می‌شود که \tilde{a} در درجه α'' مساوی با \tilde{b} است اگر:

$$\tilde{a} \geq_{\frac{\alpha''}{4}} \tilde{b}, \quad \tilde{a} \leq_{\frac{\alpha''}{4}} \tilde{b} \quad (32)$$

معادله‌ی ۳۲ را می‌توان چنین بازنویسی کرد:

$$\frac{\alpha''}{4} \leq \mu_M(\tilde{a}, \tilde{b}) \leq 1 - \frac{\alpha''}{4}$$

اکنون مدل برنامه‌ریزی ریاضی ۳۳ که در آن تمامی پارامترها به‌عنوان اعداد فازی مثلثی یا دوزنقه‌ی تعریف می‌شوند عبارت است از:

$$\text{Min } z = \tilde{c}^t x$$

s.t.

$$\tilde{a}_i x \geq \tilde{b}_i \quad i = 1, \dots, l$$

$$\tilde{a}_i x = \tilde{b}_i \quad i = l + 1, \dots, m$$

$$x \geq 0$$

(33)

$$u_{jkt} - \alpha \lambda_{jkt} + M \alpha_{jk} \leq M \quad \forall i, j, k \quad (27)$$

$$\pi_{mjt} - M \gamma \leq 0 \quad \forall m, j, t \quad (28)$$

$$-h_{mjt} - M \gamma \leq 0 \quad \forall m, j, t \quad (29)$$

$$h_{mjt} - \pi_{mjt} + M \gamma \leq M \quad \forall m, j, t \quad (30)$$

در این محدودیت‌ها، δ_{ijk} متغیر باینری و $\alpha \lambda_{jkt}$ و γ متغیرهای صحیح مثبت‌اند. مدل ارائه شده یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی ترکیبی با محدودیت‌های خطی است. نکته‌ی قابل توجه این که عدم قطعیت به دو صورت بیان می‌شود:

۱. انعطاف‌پذیری محدودیت‌ها و اهداف؛

۲. عدم قطعیت در داده‌ها.

عدم قطعیت در داده‌ها را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد:

الف) تصادفی بودن در پارامترهای مدل که از طبیعت تصادفی حوادث می‌آید و به عضویت یا عدم عضویت در یک مجموعه منجر می‌شود. معمولاً از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی برای مدل‌کردن پارامترهای تصادفی مدل استفاده می‌شود.

ب) عدم قطعیت شناختی که در اثر کمبود دانش در پارامترهای مدل ایجاد می‌شود و رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی به این نوع از عدم قطعیت می‌پردازد.

چنان که در مفروضات آورده شد، بیشتر پارامترهای مدل با عدم قطعیت روبرو هستند و باید از روشی برای نشان دادن و مواجهه با ریسک‌های مختلف استفاده کرد که از کارآمدی بالایی برخوردار باشد. از آنجا که مفهوم فازی یکی از کارآمدترین روش‌های کنترل و مدیریت ریسک و عدم قطعیت است، در این نوشتار از این مفهوم استفاده شده است. این مسئله را می‌توان با برنامه‌ی GAMS برای مسائلی با ابعاد کوچک حل کرد.

۶. رویکرد فازی مورد استفاده

تا اینجا عدم قطعیت در تقاضا در نظر گرفته شد و استراتژی ریسک اشتراکی برای مقابله با عدم قطعیت موجود در تقاضاها مورد استفاده قرار گرفت. حال با توجه به این که عدم قطعیت ممکن است در دیگر پارامترهای مسئله نیز اتفاق بیفتد، به دنبال فرموله کردن مسئله‌ی هستیم که تمامی پارامترهای آن با عدم قطعیت روبرو هستند و به دنبال روشی برای مواجهه با ریسک‌های مختلف هستیم که از کارایی و کارآمدی بالایی برخوردار باشد.

مفهوم فازی یکی از کارآمدترین روش‌های کنترل و مدیریت ریسک و عدم قطعیت است و در زمینه‌های مختلف اعم از مدیریت زنجیره‌ی تأمین، حمل‌ونقل و مسیریابی، انتخاب سبد سهام و مدیریت پروژه مکرراً مورد استفاده قرار گرفته است. در این پایان‌نامه نیز از رویکرد فازی برای مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود در مدل استفاده می‌شود و با استفاده از این رویکرد تمامی پارامترهای غیرقطعی را تحت کنترل قرار داده و برای تصمیم‌گیری‌های مختلف زنجیره به بهترین شکل از آن استفاده خواهد شد.

در ابتدا باید به دنبال روشی بود که بتوان مدل دارای پارامترهای غیرقطعی را به‌صورتی که ماهیت نامعین بودن داده‌ها حفظ شود، به‌صورت قطعی درآورد تا در حل و انجام تحلیل‌های مورد نیاز دچار ابهامات و سردرگمی نشویم و از خصوصیات مدل‌های قطعی نیز استفاده شود. در این تحقیق از روش فازی‌زدایی خیمینز^[۱۸]

مطابق آنچه که در بالا شرح داده شد، مدل قطعی هم‌ارز با مدل طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته با در نظر گرفتن ریسک اشتراکی چنین فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } w = & \sum_i \left(\frac{u_i^p + \gamma u_i^m + u_i^o}{\gamma} \right) z_i + \sum_j \left(\frac{ff_j^p + \gamma ff_j^m + ff_j^o}{\gamma} \right) x_j \\ & + \sum_l \left(\frac{g_l^p + \gamma g_l^m + g_l^o}{\gamma} \right) y_l + \sum_m \left(\frac{b_m^p + \gamma b_m^m + b_m^o}{\gamma} \right) f_m \\ & + \sum_n \left(\frac{a_n^p + \gamma a_n^m + a_n^o}{\gamma} \right) w_n \\ & + \sum_t \sum_i \sum_j \left(\frac{co_{ij}^p + \gamma co_{ij}^m + co_{ij}^o + p_{ij}^p + \gamma p_{ij}^m + p_{ij}^o}{\gamma} \right) o_{ijt} \\ & + \sum_t \sum_j \sum_k \left(\frac{cu_{jk}^p + \gamma cu_{jk}^m + cu_{jk}^o + \varphi_j^p + \gamma \varphi_j^m + \varphi_j^o}{\gamma} \right) u_{jkt} \\ & + \sum_t \sum_k \sum_l \left(\frac{cq_{kl}^p + \gamma cq_{kl}^m + cq_{kl}^o}{\gamma} \right) q_{klt} \\ & + \sum_t \sum_l \sum_m \left(\frac{cp_{lm}^p + \gamma cp_{lm}^m + cp_{lm}^o + B_l^p + \gamma B_l^m + B_l^o}{\gamma} \right) p_{lmt} \\ & + \sum_t \sum_l \sum_n \left(\frac{cs_{ln}^p + \gamma cs_{ln}^m + cs_{ln}^o + B_l^p + \gamma B_l^m + B_l^o}{\gamma} \right) s_{lnt} \\ & + \sum_t \sum_i \sum_j \left(\frac{ch_{mj}^p + \gamma ch_{mj}^m + ch_{mj}^o + \tau_m^p + \gamma \tau_m^m + \tau_m^o}{\gamma} \right) \pi_{mjt} \\ & + \sum_t \sum_i \sum_j \left(\frac{cv_{ne}^p + \gamma cv_{ne}^m + cv_{ne}^o + \theta_n^p + \gamma \theta_n^m + \theta_n^o}{\gamma} \right) \nu_{net} \\ & + \sum_t \sum_j \sqrt{\gamma A_j \left(\frac{h_{jt}^p + \gamma h_{jt}^m + h_{jt}^o}{\gamma} \right)} \chi_t \sum_k \mu_{kt} \alpha_{jk} \\ & + \sum_t \sum_j z_\alpha \left(\frac{h_{jt}^p + \gamma h_{jt}^m + h_{jt}^o}{\gamma} \right) \sqrt{\sum_i \sum_k \nu_{kt} l_{ij} \delta_{ijk}} \end{aligned}$$

$$\sum_j \alpha_{jkt} \geq \mu_{kt} \quad \forall k, t$$

$$\sum_n \nu_{net} \geq \alpha'' \left(\frac{c_{et}^m + c_{et}^o}{\gamma} \right) + (1 - \alpha'') \left(\frac{c_{et}^m + c_{et}^p}{\gamma} \right) \quad \forall e, t$$

$$\sum_l q_{klt} \geq \alpha'' \left(\frac{r_{kt}^m + r_{kt}^o}{\gamma} \right) + (1 - \alpha'') \left(\frac{r_{kt}^p + r_{kt}^m}{\gamma} \right) \quad \forall k, t$$

$$\left[\left(1 - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) \left(\frac{\eta_t^m + \eta_t^o}{\gamma} \right) + \left(\frac{\alpha''}{\gamma} \right) \left(\frac{\eta_t^m + \eta_t^p}{\gamma} \right) \right]$$

$$\sum_k q_{klt} \geq \sum_n s_{lnt} \quad \forall l, t$$

$$\left[\left(\frac{\alpha''}{\gamma} \right) \left(\frac{\eta_t^m + \eta_t^o}{\gamma} \right) + \left(1 - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) \left(\frac{\eta_t^m + \eta_t^p}{\gamma} \right) \right]$$

$$\sum_k q_{klt} \leq \sum_n s_{lnt} \quad \forall l, t$$

$$\left[1 - \left(\frac{\alpha''}{\gamma} \right) \frac{\eta_t^p + \eta_t^m}{\gamma} - \left(1 - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) \frac{\eta_t^o + \eta_t^m}{\gamma} \right]$$

$$\sum_k q_{klt} \leq \sum_m p_{lmt} \quad \forall l, t$$

مدل مذکور یک مدل فازی n بعدی با m محدودیت است، که در آن $\tilde{c}^t = (c_1^t, c_2^t, \dots, c_n^t)$ و \tilde{b}_l و \tilde{a}_l به ترتیب نشان‌دهنده‌ی بردار ضرایب تابع هدف، بردار سمت راست و ضرایب تکنولوژیک هستند. بردار تصمیم‌گیری $x \in \mathcal{X}^n$ در درجه α شدنی است اگر:

$$\min_{i=1, \dots, m} \left\{ \mu_M(\tilde{a}_i x, \tilde{b}_i) \right\} = \alpha''$$

مطابق روابط ۳۱ و ۳۲، معادلات $\tilde{a}_l x \geq \tilde{b}_l$ و $\tilde{a}_l x \geq \tilde{b}_l$ به ترتیب هم‌ارزند با:

$$\frac{E_\gamma^{a_i x} - E_\gamma^{b_i}}{E_\gamma^{a_i x} - E_\gamma^{a_i x} + E_\gamma^{b_i} - E_\gamma^{b_i}} \geq \alpha'', \quad i = 1, \dots, l$$

$$\frac{\alpha''}{\gamma} \leq \frac{E_\gamma^{a_i x} - E_\gamma^{b_i}}{E_\gamma^{a_i x} - E_\gamma^{a_i x} + E_\gamma^{b_i} - E_\gamma^{b_i}} \leq 1 - \frac{\alpha''}{\gamma}, \quad i = l + 1, \dots, m$$

این معادلات را می‌توان چنین نوشت:

$$[(1 - \alpha'') E_\gamma^{a_i} + \alpha'' E_\gamma^{a_i}] x \geq \alpha'' E_\gamma^{b_i} + (1 - \alpha'') E_\gamma^{b_i},$$

$$i = 1, \dots, l$$

$$\left[\left(1 - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) E_\gamma^{a_i} + \frac{\alpha''}{\gamma} E_\gamma^{a_i} \right] x \geq \frac{\alpha''}{\gamma} E_\gamma^{b_i} + \left(1 - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) E_\gamma^{b_i},$$

$$i = l + 1, \dots, m$$

$$\left[\frac{\alpha''}{\gamma} E_\gamma^{a_i} + \left(1 - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) E_\gamma^{a_i} \right] x \leq \left(1 - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) E_\gamma^{b_i} + \frac{\alpha''}{\gamma} E_\gamma^{b_i},$$

$$i = l + 1, \dots, m$$

به‌طور مشابه، با استفاده از روش رتبه‌بندی خمینز^[۱۹] اثبات می‌شود که یک حل‌شدنی مثل x^o یک حل بهینه α'' - پذیرش از مدل ۳۳ است اگر و تنها اگر برای تمامی بردارهای تصمیم‌گیری x -- به‌طوری که $\tilde{a}_i x \geq_{\alpha''} \tilde{b}_i$, $i = 1, \dots, l$ -- معادله‌ی زیر حفظ شود:

$$\tilde{c}^t x \geq_{\frac{1}{\gamma}} \tilde{c}^t x^o$$

بنابراین، x^o با تابع هدف کمینه‌سازی در کم‌ترین درجه $\frac{1}{\gamma}$ در برابر دیگر جواب‌های شدنی، بهترین انتخاب است. هم‌ارزی فوق را می‌توان چنین نوشت:

$$\frac{E_\gamma^{c^t x} - E_\gamma^{c^t x^o}}{\gamma} \geq \frac{E_\gamma^{c^t x^o} - E_\gamma^{c^t x^o}}{\gamma}$$

در نتیجه، استفاده از بازه مورد انتظار و مقدار مورد انتظار عدد فازی، معادله‌ی مدل α'' پارامتریک قطعی از مدل ۳۳ را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\min EV(\tilde{c}) x$$

s.t.

$$[(1 - \alpha'') E_\gamma^{a_i} + \alpha'' E_\gamma^{a_i}] x \geq \alpha'' E_\gamma^{b_i} + (1 - \alpha'') E_\gamma^{b_i}$$

$$i = 1, \dots, l$$

$$\left[\left(1 - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) E_\gamma^{a_i} + \frac{\alpha''}{\gamma} E_\gamma^{a_i} \right] x \geq \frac{\alpha''}{\gamma} E_\gamma^{b_i} + \left(1 - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) E_\gamma^{b_i}$$

$$i = l + 1, \dots, m$$

$$\left[\frac{\alpha''}{\gamma} E_\gamma^{a_i} + \left(1 - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) E_\gamma^{a_i} \right] x \geq \left(1 - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) E_\gamma^{b_i} + \frac{\alpha''}{\gamma} E_\gamma^{b_i},$$

$$i = l + 1, \dots, m$$

$$x \geq 0$$

$$\begin{aligned} \sum_k \mu_k \alpha_{jk} + \sum_m \pi_{mjt} &\leq x_j \left[\alpha'' \left(\frac{px_j^m + px_j^p}{\gamma} \right) \right. \\ &\quad \left. + (\lambda - \alpha'') \left(\frac{px_j^o + px_j^m}{\gamma} \right) \right] \quad \forall j, t \\ \sum_k q_{klt} &\leq y_l \left[\alpha'' \left(\frac{py_l^p + py_l^m}{\gamma} \right) + (\lambda - \alpha'') \left(\frac{py_l^o + py_l^m}{\gamma} \right) \right] \\ &\quad \forall l, t \\ \sum_l p_{lmt} &\leq f_m \left[\alpha'' \left(\frac{pz_m^p + pz_m^m}{\gamma} \right) + (\lambda - \alpha'') \left(\frac{pz_m^o + pz_m^m}{\gamma} \right) \right] \\ &\quad \forall m, t \\ \sum_l s_{lnt} &\leq w_n \left[\alpha'' \left(\frac{pw_n^p + pw_n^m}{\gamma} \right) + (\lambda - \alpha'') \left(\frac{pw_n^o + pw_n^m}{\gamma} \right) \right] \\ &\quad \forall n, t \\ \sum_i \beta_{ij} &\leq x_j \quad \forall j \\ \sum_j \alpha_{jk} &= \lambda \quad \forall k \\ \alpha_{jk} &\leq \sum_i \beta_{ij} \quad \forall j, k \\ \beta_{ij} &\leq z_i \quad \forall i, j \\ \sum_m \gamma_{mj} &= x_j \quad \forall j \\ \sum_j \gamma_{mj} &= f_m \quad \forall m \\ \alpha_{jk} + \beta_{ij} - \delta_{ijk} &\leq \lambda \quad \forall i, j, k \\ \delta_{ijk} &\leq \alpha_{jk} \quad \forall i, j, k \\ \delta_{ijk} &\leq \beta_{ij} \quad \forall i, j, k \\ \alpha \lambda_{jkt} - M \alpha_{jk} &\leq 0 \quad \forall j, k, t \\ -u_{jkt} + \alpha_{jk} &\leq 0 \quad \forall j, k, t \\ u_{jkt} - \alpha \lambda_{jkt} + M \alpha_{jk} &\leq M \quad \forall j, k, t \\ \pi_{mjt} - M \gamma &\leq 0 \quad \forall m, j, t \\ -h_{mjt} - M \gamma &\leq 0 \quad \forall m, j, t \\ h_{mjt} - \pi_{mjt} + M \gamma &\leq M \quad \forall m, j, t \\ x_j, y_l, f_m, w_n, \alpha_{jk}, \beta_{ij}, \delta_{ijk} &\in \{0, \lambda\} \quad \forall i, j, l, m, n, k \\ o_{ijt}, u_{jkt}, q_{klt}, p_{lmt}, s_{lnt}, h_{mjt}, v_{net}, \pi_{mjt}, \alpha \lambda_{jkt} &\geq 0 \\ &\quad \forall i, j, l, m, n, k, e, t \end{aligned}$$

۷. نتایج حل مدل فازی مسئله طراحی شبکه زنجیره‌ی تامین حلقه‌بسته

در بخش پیش بیان کردیم که برای حالتی که همه پارامترهای موجود غیرقطعی باشند می‌توان این عدم قطعیت را فازی در نظر گرفت و از روش خمینز مدل را به مدل قطعی تبدیل کرد (مدل فازی زدایی شده نیز ارائه شد). همچنین مدل ارائه شده برای

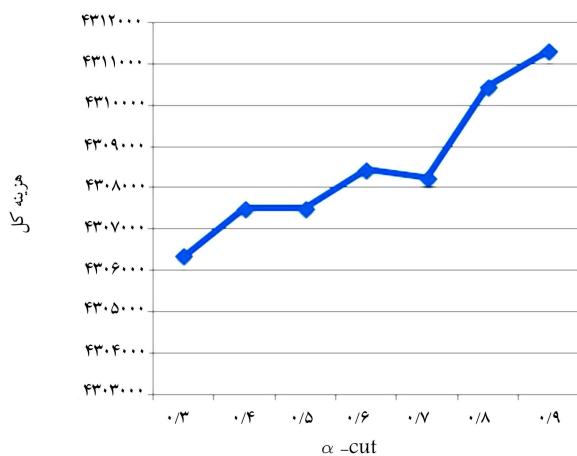
$$\begin{aligned} \left[\lambda - \left(\lambda - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) \frac{\eta_t^p + \eta_t^m}{\gamma} - \left(\frac{\alpha''}{\gamma} \right) \frac{\eta_t^o + \eta_t^m}{\gamma} \right] \\ \sum_k q_{klt} &\geq \sum_m p_{lmt} \quad \forall l, t \\ \sum_j h_{mjt} &= \sum_l p_{lmt} \quad \forall m, t \\ \sum_e v_{net} &\leq \sum_l s_{lnt} \quad \forall n, t \\ \sum_i o_{ijt} + \sum_m h_{mjt} &= \sum_k u_{jkt} \quad \forall j, t \\ \left[\lambda - \left(\lambda - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) \frac{\eta_t^p + \eta_t^m}{\gamma} - \left(\frac{\alpha''}{\gamma} \right) \frac{\eta_t^o + \eta_t^m}{\gamma} \right] \\ \sum_k q_{klt} &\geq \sum_m p_{lmt} \quad \forall l, t \\ \sum_j h_{mjt} &= \sum_l p_{lmt} \quad \forall m, t \\ \sum_e v_{net} &\leq \sum_l s_{lnt} \quad \forall n, t \\ \sum_i o_{ijt} + \sum_m h_{mjt} &= \sum_k u_{jkt} \quad \forall j, t \\ \sum_j o_{ijt} &\leq z_i \left[\alpha'' \left(\frac{pp_i^p + pp_i^m}{\gamma} \right) + (\lambda - \alpha'') \left(\frac{pp_i^o + pp_i^m}{\gamma} \right) \right] \\ &\quad \forall i, t \\ \sum_k \mu_k \alpha_{jk} + \sum_m \pi_{mjt} &\leq x_j \left[\alpha'' \left(\frac{px_j^m + px_j^p}{\gamma} \right) \right. \\ &\quad \left. + (\lambda - \alpha'') \left(\frac{px_j^o + px_j^m}{\gamma} \right) \right] \quad \forall j, t \\ \sum_k q_{klt} &\leq y_l \left[\alpha'' \left(\frac{py_l^p + py_l^m}{\gamma} \right) + (\lambda - \alpha'') \left(\frac{py_l^o + py_l^m}{\gamma} \right) \right] \\ &\quad \forall l, t \\ \sum_l p_{lmt} &\leq f_m \left[\alpha'' \left(\frac{pz_m^p + pz_m^m}{\gamma} \right) + (\lambda - \alpha'') \left(\frac{pz_m^o + pz_m^m}{\gamma} \right) \right] \\ &\quad \forall m, t \\ \sum_l s_{lnt} &\leq w_n \left[\alpha'' \left(\frac{pw_n^p + pw_n^m}{\gamma} \right) + (\lambda - \alpha'') \left(\frac{pw_n^o + pw_n^m}{\gamma} \right) \right] \\ &\quad \forall n, t \\ \left[\lambda - \left(\lambda - \frac{\alpha''}{\gamma} \right) \frac{\eta_t^p + \eta_t^m}{\gamma} - \left(\frac{\alpha''}{\gamma} \right) \frac{\eta_t^o + \eta_t^m}{\gamma} \right] \\ \sum_k q_{klt} &\geq \sum_m p_{lmt} \quad \forall l, t \\ \sum_j h_{mjt} &= \sum_l p_{lmt} \quad \forall m, t \\ \sum_e v_{net} &\leq \sum_l s_{lnt} \quad \forall n, t \\ \sum_i o_{ijt} + \sum_m h_{mjt} &= \sum_k u_{jkt} \quad \forall j, t \\ \sum_j o_{ijt} &\leq z_i \left[\alpha'' \left(\frac{pp_i^p + pp_i^m}{\gamma} \right) + (\lambda - \alpha'') \left(\frac{pp_i^o + pp_i^m}{\gamma} \right) \right] \\ &\quad \forall i, t \end{aligned}$$

آنها از اهداف مدل پیشنهادی بود مقدار متغیرهای به دست آمده برای $\alpha'' = 0.75$ در جدول ۳ ارائه می‌شود.

و همچنین چگونگی تخصیص مراکز توزیع به مشتریان، مشتریان به مراکز جمع‌آوری، مراکز جمع‌آوری به مراکز بازیافت و احیاء و مراکز احیاء به مراکز توزیع در جدول ۴ ارائه شده است.

مقدار سفارش بهینه، سطح بهینه‌ی سفارش مجدد، و سطح ذخیره‌ی احتیاطی نیز جزء نتایج مورد انتظار از مدل بودند که برای $\alpha'' = 0.75$ در جدول ۵ به ترتیب ارائه می‌شوند.

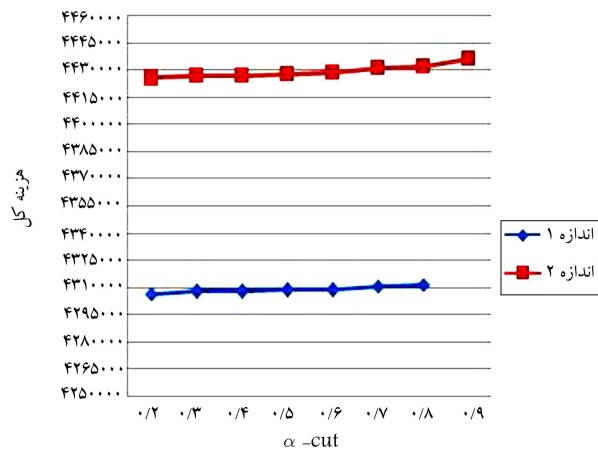
مدل برای مسئله‌ی اندازه ۲ با مقادیر جدید نیز اجرا می‌شود. حال داده‌های تصادفی برای مسئله‌ی ۲ استخراج می‌شود (جدول ۶). چنان که مشاهده می‌شود، هر قدر برش α'' بالا می‌رود هزینه‌ی کل زنجیره افزایش می‌یابد. به دلیل غیرخطی بودن مدل فازی ارائه شده به‌ازای بعضی از مقادیر α'' مسئله جواب‌شدنی ندارد. شکل ۲ روند افزایش مقدار تابع هدف را به‌ازای افزایش سطح α'' برای مدل در



شکل ۱. افزایش هزینه با افزایش برش α'' برای مسئله‌ی اندازه ۱.

جدول ۳. تسهیلات باز برای مدل فازی با اندازه ۱ و $\alpha'' = 0.75$.

نوع تسهیل	مراکز تولید	مراکز توزیع	مراکز جمع‌آوری	مراکز احیاء	مراکز بازیافت
تسهیلات باز	۲	۳ و ۱	۲ و ۱	۲ و ۱	۱



شکل ۲. افزایش هزینه با افزایش برش α'' برای مسئله با اندازه‌های ۱ و ۲.

دو اندازه‌ی مختلف نشان داده شده در جدول ۱ را به‌ازای مقادیر مختلف از برش α'' حل کرده و نتایج را ارائه می‌دهیم.

برای تولید پارامترهای فازی مثلثی، بر پایه‌ی مطالعات موجود، سه نقطه‌ی مهم (یعنی: بیشترین احتمال (c^m) ، بدبینانه‌ترین مقدار (c^p) و خوش‌بینانه‌ترین مقدار (c^o)) برای هر پارامتر مهم تخمین زده شده‌اند. برای هر پارامتر ابتدا بیشترین احتمال (c^m) به‌صورت تصادفی تولید شده و برای حالت مدل قطعی پیشنهادی، مقدار بیشترین احتمال را برای مقادیر قطعی در تمامی پارامترها به کار می‌بریم. پس از آن، بدون از دست دادن کلیت، دو عدد تصادفی (r_1, r_2) بین 0.2 و 0.8 با استفاده از توزیع یکنواخت تولید شده‌اند. همچنین بدبینانه‌ترین مقدار (c^p) و خوش‌بینانه‌ترین مقدار (c^o) از عدد فازی (\tilde{c}) با عبارات زیر محاسبه می‌شود:

$$c^o = (1 + r_1)c^m$$

$$c^p = (1 - r_2)c^m$$

برای مقایسه‌ی مدل‌های احتمالی و قطعی، تمامی مدل‌های در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS کد شده‌اند و رایانه‌ی با مشخصات Daul-core CPU RAM: 3GB Pentium(R) مورد استفاده قرار گرفته است.

اکنون نتایج حاصل از مدل فازی را به‌ازای داده‌های تصادفی برای مدل اندازه ۱ در جدول ۲ می‌آوریم. همانطور که دیده می‌شود در این مسئله نیز با بالا رفتن سطح α'' هزینه‌ی کل سیستم افزایش می‌یابد و این نشان می‌دهد که برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در سیستم باید هزینه‌ی متحمل شویم تا مانع ایجاد ریسک‌هایی شویم که ممکن است در اثر این پارامترهای ناشناخته در مدل به وجود آید. در شکل ۱ این روند افزایش هزینه نشان داده شده است. از آنجا که تعیین تعداد تسهیلات مکان

جدول ۱. اندازه‌ی مسائل مورد آزمایش.

شماره‌ی مدل	تعداد کارخانه‌ها	تعداد مراکز توزیع	تعداد مشتریان	تعداد مراکز جمع‌آوری	تعداد مراکز احیاء	تعداد مراکز بازیافت	تعداد مشتریان مواد	تعداد دوره‌های زمانی
۱	۲	۳	۶	۲	۲	۱	۲	۲
۲	۲	۵	۶	۳	۳	۲	۲	۲

جدول ۲. مقدار تابع هدف برای مقادیر مختلف α'' برای مدل اندازه ۱.

برش α''	مقدار هدف
0.9	4311320
0.8	4310450
0.7	4308246
0.6	4308446
0.5	4307505
0.4	4307501
0.3	4306352

جدول ۴. تخصیص مراکز برای مدل فازی با اندازه ۱ و $\alpha'' = 0.5$.

نوع تخصیص	مشتری k به مرکز توزیع (j, k)	مرکز جمع‌آوری m به مراکز توزیع j به	مراکز تولید (i, j)
تخصیصات	(۱,۱)، (۱,۲)، (۱,۳)، (۱,۴)، (۳,۳)، (۳,۶)	(۱,۱)، (۱,۳)	(۲,۱)، (۲,۳)

جدول ۵. سطح بهینه سفارش مجدد، سطح ذخیره احتیاطی، مقدار سفارش بهینه در هر مرکز توزیع برای مدل فازی با اندازه ۱ و $\alpha'' = 0.5$.

دوره زمانی	سطح بهینه سفارش مجدد			سطح ذخیره احتیاطی			مقدار سفارش بهینه		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
۱	۴۶۴۴	۰	۱۷۳۶	۲۲	۰	۱۱	۲۰۷	۰	۸۶
۲	۴۴۳۲	۰	۱۷۵۳	۲۱	۰	۱۲	۱۱۷	۰	۹۱

فازی در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از روش خیمینز مدل را قطعی کرده و سطح α'' برای مسئله با دو اندازه‌ی مختلف بررسی شد. نتایج حاصله نشان داد که هرچه برش α'' افزایش یابد هزینه‌ی بیشتری برای جلوگیری از ریسک‌های ناشی از این برش‌ها متحمل می‌شود.

جدول ۶. مقدار تابع هدف برای مقادیر مختلف α'' برای مدل اندازه ۲.

برش α	مقدار هدف
۰/۹	۴۴۳۵۹۳۸
۰/۸	۴۴۳۱۸۹۷
۰/۷	۴۴۳۰۷۵۱
۰/۶	۴۴۲۸۲۴۲
۰/۵	۴۴۲۷۳۰۶
۰/۴	۴۴۲۶۷۱۱
۰/۳	۴۴۲۶۵۰۱
۰/۲	۴۴۲۵۴۳۱

۸. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، مدل‌سازی ریاضی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته در شرایط عدم قطعیت تقاضا و با استفاده از استراتژی ریسک اشتراکی بررسی شد. از آنجا که در دنیای واقعی به دلیل کمبود اطلاعات بیشتر پارامترهای مدل طراحی شده غیر قطعی‌اند، سایر پارامترهای مدل را نیز به صورت فازی در نظر گرفته و از رویکرد خیمینز برای غیرفازی کردن مسئله استفاده کرده‌ایم. سرانجام مدل نهایی برای دو اندازه‌ی متفاوت مسئله اجرا شد و نتایج نشان داد که با بالا بردن برش α'' هزینه‌های کل سیستم افزایش می‌یابد. همچنین نتایج ارائه شده نشان داد که مدل ارائه شده سطح بهینه‌ی سفارش مجدد، سطح ذخیره‌ی احتیاطی و مقدار سفارش بهینه را نیز نشان می‌دهد.

اندازه‌های ۱ و ۲ مقایسه می‌کند. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش اندازه‌های مدل مقدار تابع هدف کل افزایش داشته است و این به دلیل افزایش هزینه‌ها (نظیر هزینه‌های باز کردن تسهیلات و هزینه‌های حمل و نقل و...) منطقی است. در این بخش عدم قطعیت موجود در پارامترهای مدل به صورت برنامه‌ریزی

پانوشته‌ها

1. collection
2. gate keeping or selection
3. sorting
4. disposition
5. mixed-integer programming

منابع (References)

1. Jones, T. and Riley, D.W. "Using inventory for competitive advantage through supply chain management", *The international Journal of Physical Distribution and Materials Management*, **15**, pp. 16-26 (1985).
2. Rogers, D.S. and Tibben-Lembke, R.S. "Going backwards: Reverse logistics trends and practices", Reverse Logistics Executive Council, Pittsburgh, PA. (1999).
3. Pishvaei, M.S., Rabbani, M. and Torabi, S.A. "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Applied Mathematical Modeling*, **35**, pp. 637-649 (2010).
4. Gaur, S. and Ravindran, A.R. "A bi-criteria model for the inventory aggregation problem under risk pooling", *Computers & Industrial Engineering*, **51**(3), pp. 482-501 (2006).
5. Liu, K., Zhou, Y. and Zhang, Z. "Capacitated location model with online demand pooling in a multi-channel supply chain", *European Journal of Operational Research*, **207**, pp. 218-231 (2010).
6. You, F. and Grossmann, I.E. "MINLP model and algorithms for optimal design of large-scale supply chain with multi-echelon inventory and risk pooling under demand uncertainty", 10th International Symposium on Process Systems Engineering - PSE. Elsevier B.V (2009).

7. Weng, Z.K. "Risk-pooling over demand uncertainty in the presence of product modularity", *International Journal of Production Economics*, **62**, pp. 75-85 (1999).
8. Pasternack, B. and Drezner, Z. "Optimal inventory policies for substitutable commodities with stochastic demand", *Naval Research Logistics*, **38**, pp. 221-240 (1991).
9. Lai, Y.J. and Hwang, C.L. "Fuzzy mathematical programming: Methods and applications", *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, **394**, Springer, Berlin (1992).
10. Chen, S.P. and Chang, P.C. "A mathematical programming approach to supply chain models with fuzzy parameters", *Engineering Optimization*, **38**, pp. 647-669 (2006).
11. Torabi, S.A. and Hassini, E. "An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning", *Fuzzy Sets and Systems*, **159**(2), pp. 193-214 (2008).
12. Liang, T.F. "Integrating production-transportation planning decision with fuzzy multiple goals in supply chains", *International Journal of Production Research*, **46**, pp. 1477-1494 (2008).
13. Peidro, D., Mula, J., Poler, R. and Verdegay, J.-L. "Fuzzy optimization for supply chain planning under supply, demand, and process uncertainties". *Fuzzy Sets and Systems*, **160**, pp. 2640-2657 (2009).
14. Sakawa, M., Nishizaki, I. and Uemura, Y. "Fuzzy programming and profit and cost allocation for a production and transportation problem", *European Journal of Operational Research*, **131**, pp. 1-15 (2001).
15. Petrovic, D., Roy, R. and Petrovic, R. "Supply chain modeling using fuzzy sets", *International Journal of Production Economics*, **59**(1-3), pp. 443-453 (1999).
16. Pishvaei, M.S. and Torabi, S.A. "A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Fuzzy Sets and Systems*, **161**, pp. 2668-2683 (2010).
17. Park, S., Lee, T.-E. and Sung, C.S. "A three-level supply chain network design model with risk-pooling and lead times", *Transportation Research - Part E: Logistics and Transportation Review*, **46**(5), pp. 563-581 (2010).
18. Jimenez, M., Arenas, M., Bilbao, A. and Rodriguez, M.V. "Linear programming with fuzzy parameters: An interactive method resolution", *European Journal of Operational Research*, **177**, pp. 1599-1609 (2007).
19. Jimenez, M. "Ranking fuzzy numbers through the comparison of its expected intervals", *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge Based Systems*, **4**(4), pp. 379-388 (1996).
20. Parra, M.A., Terol, A.B., Gladish, B.P. and Rodriguez Uria, M.V. "Solving a multiobjective possibilistic problem through compromise programming", *European Journal of Operational Research*, **164**, pp. 748-759 (2005).
21. Lai, Y.J. and Hwang, C.L. "A new approach to some possibilistic linear programming problems", *Fuzzy Sets and Systems*, **49**, pp. 121-133 (1992).