سیستم‌های فازی و کاربردها
سال چهارم، شماره اول (بهار و تابستان ۱۴۰۰)
صص. ۱ تا ۴۶

شاپای چاپی: ۲۷۱۷-۴۴۰۹
شاپای الکترونیکی: ۲۷۱۷-۳۹۸۴
DOI:10.22034/JFSA.2021.140201

طراحی شبکه توزیع استوار با در نظر گرفتن عدالت در توزیع تحت شرایط عدم‌قطعیت فازی (مطالعه موردی: استان تهران)

محمد حسین دهقانی صدرآبادی و علی بزرگی امیری

دانشجو دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۳

چکیده

طراحی شبکه توزیع از جمله اقدامات مهمی است که باید توسط مدیریت زنجیره‌تأمین اتخاذ شود. تصمیمات مرتبط با طراحی شبکه توزیع همواره در شرایط وقوع ریسک‌های مختلف و به ویژه عدم‌قطعیت اتخاذ می‌شوند، از این رو نیاز است که روشی نظام‌مند به منظور مقابله با چنین ریسک‌هایی به کار گرفته شود. در این پژوهش یک شبکه توزیع رو به جلو و پنج سطحی با هدف حداقل کردن هزینه‌های کل، مجموع اثرات زیست‌محیطی و برقراری عدالت اجتماعی از طریق حداقل کردن حداکثر کمبود محصولات در مناطق مشتری در نظر گرفته شده است. همچنین مسأله تحت شرایط عدم‌قطعیت فازی مدلسازی شده است که نتایج خروجی حاصل از حل هر دو مدل قطعی و غیرقطعی مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که روش برنامه‌ریزی استوار امکانی به منظور مقابله با عدم‌قطعیت به کار گرفته شده است. در مدل استوار ارائه شده پارامترها به صورت اعداد فازی در نظر گرفته شده‌اند و همچنین سطوح اطمینان بهینه نیز به کمک روش بهینه‌سازی استوار تعیین شده‌اند.(ادامه دارد)

عبارات و کلمات کلیدی: طراحی شبکه توزیع، برنامه‌ریزی فازی، عدم‌قطعیت فازی، بهینه‌سازی استوار، شبیه‌سازی فازی

Email(s): .

Mathematics Subject Classification (2010): 93C42

از سوی دیگر به منظور کسب اطمینان از عملکرد و اعتبار مدل ارائه شده، یک مطالعه موردی بر مبنای دنیای واقعی به مدل ریاضی اعمال شده است و نتایج با خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی مسأله مقایسه شدند. نتایج حاکی از این است که در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در شبکه توزیع در کوتاه مدت منجر به افزایش هزینه‌ها می‌گردد اما در طولانی مدت سبب افزایش آمادگی شبکه توزیع در برابر ریسک‌ها و کاهش هزینه‌ها به خصوص هزینه‌های مواجهه با ریسک، فروش از دست رفته و نگهداری از موجودی می‌شود.

۱ مقدمه

امروزه محیط کسب و کار به طور پیوسته در حال تغییرات و آشفتگی‌های گوناگونی است که همین امر منجر به شکل‌گیری رقابت در بازارهای جهانی می‌گردد. افزایش انتظارات و خواسته‌های مشتریان، پیچیدگی فضای کسب و کار، هزینه‌ها و پیامدهای کمبود محصولات سبب شده است که سازمان‌ها به شدت بر طراحی سیستم لجستیک و زنجیره توزیع خود با هدف تحویل کالا با بهترین کیفیت در کمترین زمان به مشتری متمرکز شوند [۱]. مسائل برنامه‌ریزی در سه سطح استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی مورد بحث قرار گرفته‌اند که طراحی شبکه توزیع در رده تصمیمات استراتژیک قرار می‌گیرد که شامل تعیین تعداد و محل تسهیلات، جریان مواد، موجودی، نحوه تخصیص تسهیلات به یکدیگر به گونه‌ای است که علاوه بر ارضای تقاضای مشتریان هزینه‌های کل سیستم نیز حداقل گردد [۲]. انبارهای واحدهای تولیدی سهم قابل ملاحظه‌ای از هزینه‌های یک شبکه توزیع را در زنجیره‌تأمین در بر می‌گیرند. در چنین شرایطی مدیریت زنجیره‌تأمین مایل به بررسی مکان این جزء از شبکه لجستیک می‌باشد، چرا که مکان‌یابی این تسهیلات روی توانایی شرکت برای رقابت و جنبه‌های دیگر تولید مؤثر است. همچنین در بخش‌های تولیدی مکانیابی درست انبارها اثر مستقیم روی هزینه از طریق هزینه انتقال بین بخش‌ها دارد و در بخش‌های خدماتی نیز می‌تواند روی مقدار تقاضا مؤثر باشد [۳]. بنابراین در یک زنجیره توزیع انبارها باید به دقت مورد توجه قرار بگیرند و به نحوی مکانیابی گردند که بهترین عملکرد برای آنها تضمین شود.

مساله طراحی شبکه توزیع شامل تصمیمات مکانیابی، تخصیص ناوگان و مسیریابی

می‌باشد. هدف کلی مسائل طراحی شبکه توزیع، تعیین بهینه راه انتقال کالا از گره‌های عرضه به گره‌های تقاضا است به طوریکه تقاضای مشتریان برآورده شده و کل هزینه‌های توزیع شامل هزینه‌های احداث تسهیلات، نگهداری موجودی، فروش از دست رفته و حمل و نقل حداقل گردد. هر مسئله مکان‌یابی را می‌توان به چهار قسمت تجزیه کرد : قسمت اول تعیین تعداد تسهیلاتی که باید مستقر شوند. قسمت دوم، تعیین مکان مناسب برای استقرار هر کدام از تسهیلات. قسمت سوم تعیین اندازه و ظرفیت هر کدام از آنها و قسمت آخر تعیین نحو تخصیص تقاضای خدمت به هر یک از این مراکز.

با توجه به اینکه محیط کسب و کار به طور مداوم در حال تغییرات است و زنجیره‌های تأمین با شرایط دشوار مختلفی روبرو می‌شوند، برنامه‌ریزی توزیع در چنین شرایطی برای شرکت‌ها بسیار سخت و هزینه بر است و ممکن است شبکه‌های توزیع با کمبودهای فراوان و فروش از دست رفته مواجه شوند. بروز هرگونه کمبود محصولات در مناطق مشتری منجر به نارضایتی مشتریان و کاهش اعتبار سازمان می‌گردد، بنابراین یک برنامه نظام‌مند باید به منظور مقابله با ریسک‌های عملیاتی و جلوگیری از وقوع کمبود محصولات به کار گرفته شود [۴]. با پیشرفت جوامع و گسترش تکنولوژی خواسته‌ها و نیازهای مشتریان در شبکه‌های توزیع بسیار گسترده شده است و همگی انتظار دارند که محصول مد نظر آنها در کوتاه‌ترین زمان ممکن با با بالاترین کیفیت در اختیار آنها قرار بگیرد. وقوع هر گونه کمبود به صورت فروش از دست رفته در مناطق مشتری می‌تواند منجر به نارضایتی آنها و کاهش اعتبار برند شرکت‌ها گردد. بنابراین در هر شبکه توزیع برنامه‌ریزی باید به نحوی صورت پذیرد که کمترین میزان کمبود محصولات رخ دهد و در صورت بروز کمبود نیز عدالت در توزیع محصولات میان مناطق مشتری رعایت گردد [۵].

بر اساس مباحث مطرح شده، مجموعه‌ای از اقدامات اصلاحی به منظور گسترش عملکرد شبکه توزیع در این پژوهش در نظر گرفته شده است که به شرح ذیل می‌باشند. با توجه به اهمیت بالای کمبود محصولات در شبکه توزیع، کمبود به صورت فروش از دست رفته و با هزینه زیاد در نظر گرفته شده است. با توجه به الزامات زیست‌محیطی توسط سازمان‌های ناظر و همچنین سیاست‌های سبز در شرکت‌ها، تلاش شده است تا مجموع اثرات زیست‌محیطی شامل گازهای گلخانه‌ای تولید شده ناشی از استقرار و فعالیت شبکه توزیع به حداقل ممکن کاهش یابد. از سوی دیگر بروز کمبود در مناطق مشتری باید به

نحوی باشد که اثرات آن میان مناطق مختلف به طور متعادل پخش گردد تا از این طریق کمترین آسیب به هر یک از مناطق مشتری وارد گردد که برای این منظور نیاز به برقراری عدالت در توزیع محصولات وجود دارد. تغییرات مداوم در محیط کسب و کار سبب شده است که برنامه‌ریزی توزیع به آسانی قابل اجرا نباشد و همواره مشکلات متعددی از قبیل افزایش هزینه‌ها، کاهش ظرفیت‌ها و افزایش تقاضا در شبکه رخ دهد که از نتایج وقوع ریسک در محیط کسب و کار می‌باشد. بنابراین برای کنترل بهتر نوسانات و مدیریت تقاضای مشتریان نیاز است که از روش‌های مناسبی برای مدیریت ریسک در شبکه توزیع استفاده گردد. مدل عرضه شده از پنج سطح شامل تأمین‌کننده، انبار مرکزی، انبار سطح شهر، توزیع‌کننده و مشتری نهایی تشکیل شده است که در پژوهش فعلی کمبود به صورت فروش از دست رفته لحاظ شده است و همچنین تلاش شده است که عدالت اجتماعی بین مناطق مختلف مشتری از لحاظ کمبود محصولات با افزودن یک تابع حداقل حداکثر کمبود میان این مناطق برقرار شود. از سوی دیگر برای کاهش اثر عدم‌قطعیت از رویکرد ترکیبی فازی و بهینه‌سازی استوار[1] در قالب برنامه‌ریزی استوار امکانی[2] بهره گرفته شده است که در قسمت نتایج خروجی‌های هر دو مدل قطعی و غیر قطعی مقایسه شده‌اند.

ساختار مقاله به این صورت خواهد بود که در بخش ۲ مروری مختصر بر ادبیات پژوهش انجام می‌شود، همچنین در بخش ۳ مسأله، موضوع تحقیق و ایده‌ی اصلی مدلسازی ریاضی فعلی به تفضیل بیان خواهد شد. در بخش ۴ مدلسازی ریاضی صورت گرفته در پژوهش بیان می‌شود. در بخش ۵ در مورد نحوه حل مسأله، ابزارها و نرم افزارهای مورد استفاده بحث خواهد شد و در نهایت در بخش ۶ نتایج محاسباتی و مدیریتی استخراج شده از مدل به تفضیل بیان خواهند شد.

۲ مرور ادبیات

شبکه زنجیره‌تأمین از مجموعه‌ای از تسهیلات شامل تأمین‌کنندگان، انبارها، مراکز تولید، مناطق مشتریان، نقاط انتقال، مراکز جمع‌آوری محصولات مستهلک یا عودت داده شده، مراکز دفع، بازیافت و ... تشکیل شده است که ارتباط میان این اجزا یا با هدف

[1] Robust optimization

[2] Robust possibilistic programming

دریافت مواد خام، تبدیل آن به محصولات نهایی و توزیع محصولات در مناطق مشتری صورت می‌گیرد و یا محصولات مستهلک و استفاده شده پس از بازیافت و احیا مجدد به زنجیره‌تأمین وارد می‌شوند [۶]. یک شبکه توزیع تنها در صورتی می‌تواند نیاز مصرف‌کننده را رفع کند که به صورتی اثربخش، کارآمد و استوار طراحی شده باشد. مدیریت شبکه توزیع شامل مجموعه‌ای از اقدامات و راه‌کارها به منظور یکپارچه‌سازی عملکرد اجزای زنجیره با هدف کاهش هزینه‌های شبکه و نیز افزایش سطح خدمت‌رسانی به مشتریان است. هدف نهایی مدیریت شبکه توزیع، بهبود رقابت در فضای پیچیده‌ی کسب و کار می‌باشد [۷].

در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی در حوزه طراحی شبکه توزیع صورت گرفته است اما اکثر این مطالعات بر مسأله مکانیابی انبارها تأکید ویژه‌ای دارند. انبارها به دلایل گوناگونی نظیر پاسخگویی به نیازهای مشتری در مواقع دیرکرد تأمین‌کنندگان، مشکلات تولید و ... نقشی حیاتی در شبکه توزیع دارند. از این رو برنامه‌ریزی در ارتباط با مکان انبارها و ظرفیت آنها همواره در ادبیات موضوع مورد بحث قرار گرفته است. برای مثال سیوا و فیگورا مسأله مکانیابی انبارها با ظرفیت مشخص را تحت محدودیت احتمالات پس افت شدن، مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش هر تسهیل به عنوان یک صف مستقل مدل شده است و همه‌ی این موارد برای به دست آوردن فرمول احتمالات پس افت در نقاط بالقوه تسهیلات به کار گرفته می‌شوند [۸]. مسأله مکان‌یابی انبار و تخصیص مشتریان به آنها از موضوعات اساسی طراحی سیستم توزیع می‌باشد، چرا که توانایی تولید و ارائه محصولات به بازار تا حد زیادی وابسته به مکان انبار و توانایی آن در برآورده کردن نیاز مشتریان می‌باشد . کلوسه و درکسل مدلی برای مکانیابی تسهیلات در سیستم توزیع با هدف بهینه‌سازی این سیستم ارائه نمودند [۹]. بارتو و همکاران حل مسأله مکانیابی مسیریابی انبارها با ظرفیت محدود را با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی انجام دادند. این مسأله ترکیبی از دو مسأله مکانیابی و برنامه‌ریزی حمل و نقل است که با استفاده از خوشه‌بندی مسأله با رویکرد فرا ابتکاری حل شده است [۱۰]. پرینز، پرودهان و همکاران حل مسأله مکانیابی مسیریابی انبارها با ظرفیت محدود را با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جست و جو ممنوعه و روش لاگرانژ مورد بررسی قرار دادند. هدف این مسأله انتخاب توأم مسیر حمل و نقل و مکان مناسب برای انبارها با هدف برآورده کردن تقاضای مشتری و حداقل کردن هزینه‌ی کل سیستم توزیع است [۱۱]. در دهه اخیر

به استفاده از مراکز توزیع جهت ارائه خدمات بهتر و در عین حال کاهش هزینه‌های توزیع توجه زیادی شده است، چرا که وجود یک شبکه توزیع مناسب از جمله عواملی است که منجر به مدیریت لجستیک می‌شود. چن و تینگ پژوهشی را در زمینه‌ی مکانیابی انبار با ظرفیت محدود مطرح کردند که در آن برای حل دقیق مسأله از ترکیب روش ابتکاری لاگرانژ و فراابتکاری لانه مورچه چندگانه استفاده نمودند و این الگوریتم ترکیبی را برای این مسأله گسترش دادند [۱۲]. مطالعات انجام‌شده در حوزه مکانیابی و تعیین ظرفیت انبارها با محدودیت‌هایی مواجه هستند، برای مثال در نظر گرفتن انبارها با ظرفیت پویا یا متغیر در هر دوره، امکان انتقال عرضی محصولات میان انبارها و در نظر گرفتن انبارهای موقت در شرایط بحران و کمبود و از جمله شکافهای تحقیقاتی است که در این حوزه یافت می‌شود.

تغییرات مداوم در محیط کسب و کار و بروز حوادث پیشبینی نشده یکی از خطرات مهمی است که هر زنجیره توزیعی را تهدید می‌کند و در صورتی که برنامه مدون برای مقابله با ریسک در سیستم در نظر گرفته نشود، بروز هر نوع ریسک اعم از عدم‌قطعیت و اختلال می‌تواند آسیب‌های جدی به سازمان‌ها وارد کند. مطالعات متعددی در حوزه برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک در شبکه توزیع صورت پذیرفته است، برای مثال لین در پژوهش خود شرایط عدم قطعیت را در مکانیابی انبار با ظرفیت محدود در سیستم توزیع در نظر گرفت که در این مسأله باید مجموعه‌ای از انبارها برای برآورده کردن تقاضا سیستم در شرایط عدم‌قطعیت با هدف حداقل کردن هزینه‌ی کل انتخاب شود و تسهیلات باید یک سطح سرویس مشخص داشته باشند که این موضوع با استفاده از محدودیت‌های شانسی مدل شده است [۱۳]. جعفری و همکاران مدلی چند هدفه برای مکانیابی مراکز توزیع در محیط فازی ارائه کردند. در پژوهش آنها با در نظر گرفتن فرض چند تسهیلی در مسأله، یک تابع مطلوبیت برای اهمیت روابط تسهیلات به عنوان هدف ثانویه به مسأله اضافه شده است [۱۴]. یو و همکاران یک روش ابتکاری شبیه‌سازی آنیلینگ را برای حل مسأله مکانیابی مسیریابی انبارها پیشنهاد کردند. در این پژوهش یک شبیه‌سازی آنیلینگ بر اساس رویکرد فراابتکاری برای حل مسأله پیشنهاد می‌گردد و در سه سناریوی مختلف این رویکرد بر اساس اطلاعات بنچمارک‌های تعیین شده بررسی می‌شود [۱۵]. فاضل زرندی و همکاران مسأله مکانیابی مسیریابی انبارها با ظرفیت محدود را در حالتی در

نظر گرفتند که زمان سفر غیر قطعی می‌باشد [۱۶]. در سال کوککدنیز، بارای و همکاران در پژوهش خود روشی را برای حل مسأله مکانیابی انبارها با ظرفیت محدود را در شرایط عدم قطعیت ارائه نمودند. در این پژوهش روش میانگین‌های C فازی و برنامه‌ریزی محدب برای حل مسأله با یکدیگر ترکیب شده‌اند [۱۷]. کنتاردو و همکاران در پژوهش خود نحوه مکانیابی مراکز توزیع با ظرفیت محدود را با استفاده از یک الگوریتم پیشنهادی دقیق برای حل این مسأله ارائه کردند [۱۸]. نادی زاده و حسینی نسب در پژوهش خود نحوه مکانیابی مسیریابی انبارهای پویا با در نظر گرفتن محیط فازی مورد بررسی قرار داده‌اند که برای حل مسأله مذکور از یک رویکرد ترکیبی فراابتکاری استفاده شده است [۱۹]. رحمانی و میرحسینی یک الگوریتم فراابتکاری شامل ترکیبی از الگوریتم های کرم شبتاب و ژنتیک را برای حل مسأله مکانیابی انبارها با ظرفیت محدود ارائه نمودند تا تقاضای مشتریان برآورده شود و هزینه‌های سیستم حداقل گردد [۲۰]. دیابت در پژوهش خود حل مسأله مکانیابی انبار با ظرفیت محدود با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی و کنترل موجودی در حالت تک منبعی را ارائه نمود [۲۱]. نادی‌زاده و کفاش مسأله مکانیابی و مسیریابی یک انبار با ظرفیت محدود را در شرایط فازی و با در نظر گرفتن تحویل و انتقال همزمان بررسی کردند. هدف در این مسأله حداقل کردن هزینه مسیریابی، هزینه تأسیس انبارها و به کارگیری وسایل حمل و نقل است [۲۲]. ظهیری و همکاران یک مدل چندهدفه، یکپارچه، تاب‌آور، پایدار و استوار برای طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین دارو را تحت شرایط عدم‌قطعیت ارائه نمودند. به منظور مقابله با ماهیت عدم‌قطعیت در این مسأله، یک رویکرد امکانی تصادفی در حالت فازی گسترش داده شده‌است [۲۳]. ساک هنگ و همکاران به منبع‌یابی و تصمیمات موجودی‌ها در سیستم تولیدی مونتاژ بر اساس سفارش[3] تحت ریسک عدم‌قطعیت[4] یا ریسک عملیاتی[5] تأمین‌کننده پرداختند و برای مقابله با عدم‌قطعیت از یک رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده نمودند [۲۴]. جبارزاده و همکاران به طراحی زنجیره‌تأمین استوار، تاب‌آور، پایدار و همچنین آنالیز پایداری تحت ریسک‌های اختلالی و عملیاتی پرداختند. در این پژوهش ایشان به دنبال ارائه‌ی یک مدل ترکیبی برای طراحی شبکه توزیع پایدار هستند، به گونه‌ای که بتواند در

[3] Assemble-To-Order

[4] Uncertainty

[5] Operational risk

برابر اختلال‌ها به صورت تاب‌آور و در برابر عدم‌قطعیت به صورت استوار عمل کند [۲۵]. پژوهش‌های فراوانی در حوزه مدیریت ریسک در شبکه توزیع انجام شده است که هر دو نوع ریسک عدم‌قطعیت و عملیاتی را شامل می‌شود. اعتبارسنجی مدل‌های استوار و تاب‌آور در ادبیات موضوع از جمله نکات مهمی است که نیازمند توجه بیشتری می‌باشد.

شکاف‌های تحقیقاتی در حوزه ادبیات موضوع به شرح ذیل می‌باشند. تمرکز تعداد زیادی از پژوهش‌ها بر فضای قطعی است، بنابراین در نظر گرفتن ریسک عدم‌قطعیت و استفاده از ابزارهایی نظیر برنامه‌ریزی فازی و بهینه‌سازی استوار با هدف کاهش میزان آسیب‌های وارده به زنجیره‌تأمین در مواقع بروز ریسک نیازمند مطالعات جدی است. در پژوهش‌های بسیاری تمرکز کاملا بر کارایی اقتصادی و دستیابی به سودآوری بالا است، در حالی که اهدافی همچون برقراری عدالت اجتماعی، کاهش میزان آلودگی هوا و افزایش سطح رفاه اجتماعی از جمله اهداف مهم و نیازمند برنامه‌ریزی هستند. بسیاری از پژوهش‌ها ضعف اساسی در اعتبارسنجی نتایج دارند، از این رو پیاده‌سازی یک رویکرد مناسب به منظور اطمینان حاصل کردن از صحت و دقت نتایج می‌تواند نقطه عطفی در ادبیات موضوع باشد. همچنین در اکثر مقالات مجموعه نقاط کاندید برای احداث تسهیلات جدید بیشتر با تکیه بر نظرات خبرگان تعیین شده بودند و هیچگونه آنالیز و تحلیل ریاضیاتی برای انتخاب این نقاط صورت نپذیرفته بود.

پژوهش پیش رو به صورت یک مسأله مکانیابی تخصیص، چند هدفه، غیر قطعی، چند تسهیلی، ظرفیت محدود، چند منبعی با در نظر گرفتن اهداف حداقل کردن هزینه‌ی سیستم، اثرات زیست‌محیطی کل و برقرای عدالت اجتماعی در توزیع محصولات نهایی مدلسازی شده است. هدف اقتصادی از جمله متداول‌ترین اهداف در مسائل طراحی شبکه توزیع می‌باشد، اما دلایل مشخصی برای به کارگیری اهداف اثرات زیست‌محیطی و عدالت اجتماعی در این پژوهش وجود دارد. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی پیرامون سبز بودن زنجیره‌های تأمین با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی یا آلودگی‌های ایجاد شده صورت گرفته است. در واقع هدف زیست‌محیطی به دنبال آن است که اثرات گلخانه‌ای ناشی از احداث تسهیلات جدید، فرآیندهای حمل و نقل و عملیاتی به حداقل ممکن کاهش یابد. در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی در یک زنجیره‌تأمین سبب می‌شود که اعتماد مشتریان به آن برند افزایش یابد که همین امر منجر به افزایش تقاضای محصولات

می‌گردد. از سوی دیگر در هر شبکه توزیع مشتریان خواستار برآورده شدن تقاضای خود و رعایت عدالت در توزیع محصولات هستند و مایل‌اند که سازمان‌ها محصولات را به نحوی میان مناطق مختلف مشتری توزیع کنند که کمبود میان مناطق مختلف سرشکن شود و آسیب جدی به هیچکدام از مناطق مشتری وارد نشود.

در این پژوهش دو تسهیل انبار مرکزی و انبار سطح شهر به عنوان تسهیلات جدید و نیازمند احداث تلقی می‌گردند، از این رو روشی مبتنی بر ترکیب نظریه فازی و روش تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب نقاط کاندید از میان نقاط بالقوه انتخاب شده توسط خبره در نظر گرفته شده است. در پژوهش پیش روی تلاش شده است زنجیره‌تأمین به سمت سبز بودن پیش برود که این مهم به کمک در نظر گرفتن دو تابع هدف حداقل‌سازی هزینه‌های کل و مجموع اثرات زیست‌محیطی به طور همزمان محقق شده است. با توجه به اینکه برقراری عدالت در توزیع محصولات میان مشتریان هدف بسیار با اهمیتی است، بنابراین در این پژوهش از یک تابع هدف حداقل‌سازی حداکثر کمبود میان مناطق مشتری استفاده شده است. با توجه به تأثیر زیاد عدم‌قطعیت بر ظرفیت انبارها و سایر پارامترها، تلاش شده است به منظور جلوگیری از نشدنی بودن مسئله و در نظر گرفتن وقوع تمامی حالت‌های ممکن برای هزینه‌های احداث و هزینه های متغیر، عدم‌قطعیت با استفاده از مدل ریاست امکانی در مسأله لحاظ شود. توسعه اول در قالب بخش ۳-۲ و استفاده همزمان از تکنیک‌های برنامه‌ریزی فازی، روش بهترین- بدترین[۶] و تاپسیس با هدف شناسایی نقاط کاندید برای احداث تسهیلات و در نهایت مدلسازی مسأله صورت گرفته است. توسه دوم به کمک تابع هدف (۱۵) و در نظر گرفتن متوسط ظرفیت تسهیلات حمل و نقل صورت گرفته است. توسعه سوم در قالب افزودن یک تابع هدف به صورت رابطه (۱۶) و خطی‌سازی آن در قالب روابط (۴۸) و (۴۹) انجام شده است. همچنین توسعه چهارم نیز به طور کامل در بخش ۵-۳ مورد بحث قرار گرفته است.

۳ بیان مسئله و موضوع تحقیق

در این بخش به شرح مسأله، اهداف و فرضیات تحقیق می‌پردازیم. مسأله مورد مطالعه در این پژوهش بر اساس یک مطالعه موردی واقعی است. در این تحقیق، مسأله طراحی

[6] Best-Worst Method

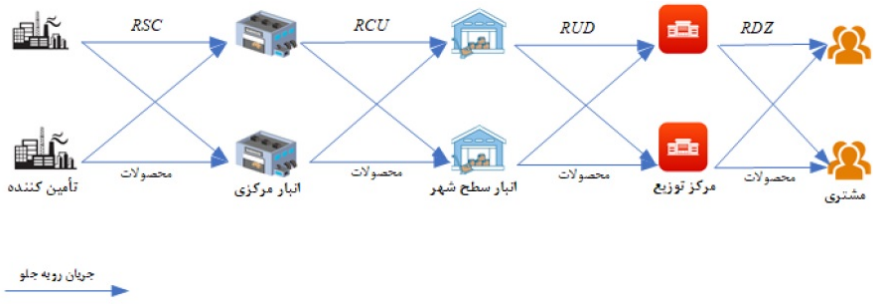
شبکه توزیع پنج سطحی رو به جلو به صورت چند محصولی، چند سطحی و چند دوره‌ای در نظر گرفته شده است که سیستم مربوطه در معرض ریسک عدم‌قطعیت قرار دارد. بر اساس شکل ۱، شبکه توزیع مورد بررسی شامل سطوح تأمین‌کننده، انبار مرکزی[۷]، انبار سطح شهر[۸]، مرکز توزیع و مناطق مشتری محصولات می‌باشد. انبارها نقشی کلیدی در فرآیند توزیع محصولات، جلب رضایت مشتری و کاهش هزینه‌های سیستم توزیع دارند، بنابراین در این مسأله تلاش شده است که این جز از شبکه به دقت مکانیابی گردد. از سوی دیگر با توجه به بروز نوسانات و تغییرات متعدد در بازار و همچنین دشواری فرآیند توزیع به تمامی مناطق مشتری، نیاز است که محصولات ابتدا در انبارهای مرکزی نگهداری شوند و بر حسب تقاضا به انبارهای سطح شهر ارسال گردند تا از این طریق در اختیار مشتریان قرار بگیرند. در واقع وجود موجودی در انبارهای مرکزی و انبارهای سطح شهر منجر به افزایش توانایی شبکه در جلب رضایت مشتریان از طریق برآورده کردن تقاضای آنها در کوتاه‌ترین زمان ممکن با کمترین هزینه می‌گردد.

جریان محصولات در این شبکه به صورت رو به جلو است که شامل انتقال محصولات از تأمین‌کنندگان به انبارهای مرکزی، از انبارهای مرکزی به انبارهای سطح شهر، از انبارهای سطح شهر به توزیع‌کننده‌ها و در نهایت توزیع محصولات در مناطق مشتری می‌باشد. همچنین فرض شده است که تمامی سطوح و اجزای شبکه توزیع در برابر ریسک عدم‌قطعیت آسیب‌پذیر هستند. به عبارت دیگر عدم‌قطعیت منجر به تأثیر بر روی توانایی برآورده کردن تقاضای مشتریان و پارامترهای سیستم می‌گردد. به منظور کاهش اثرات مخرب ریسک‌های بیان شده از ترکیب دو رویکرد برنامه‌ریزی فازی و بهینه‌سازی استوار در قالب روش استوار امکانی به منظور حداقل کردن هزینه‌های کل سیستم، مجموع اثرات زیست‌محیطی و حداکثر کمبود در مناطق مشتری بهره گرفته شده است.

تصمیمات مسأله شامل تعیین مکان بهینه برای احداث انبارهای مرکزی و انبارهای سطح شهر، تعیین نحوه تخصیص تسهیلات سطوح مختلف به یکدیگر، تعیین حجم جریان بهینه میان سطوح مختلف، تعیین میزان موجودی بهینه در سطوح انبار مرکزی، انبار سطح شهر و مرکز توزیع و تعیین میزان فروش از دست رفته در مناطق مشتری می‌باشد.

[7] Central warehouse

[8] Urban depot



شکل ۱: *اجزای شبکه توزیع مورد بررسی در پژوهش*

۱.۳ مفروضات مسئله

به طور کلی مفروضات این مسأله به شرح ذیل می‌باشند:

- مکان‌یابی به صورت گسسته انجام می‌گیرد.
- هر مشتری می‌تواند به بیش از یک مرکز توزیع تخصیص یابد اما تخصیص مربوط به سایر تسهیلات به صورت یگانه است.
- برای ارائه خدمات ظرفیت تسهیلات محدود است.
- بر اساس ملاحظات فنی تعداد محدود و مشخصی انبار مرکزی و انبار سطح شهر می‌توان احداث نمود.
- با افزایش اندازه محموله هزینه انتقال افزایش می‌یابد.
- کمبود برای مشتری مجاز است و به صورت فروش از دست رفته تلقی می‌شود.
- مشتری امکان تحویل پیش از موعد محصول را دارد که این محصولات مشمول هزینه نگهداری می‌شوند.
- به سبب تغییرات مداوم و پیوسته در محیط کسب و کار و مقابله با این نوسانات، اجزای شبکه توزیع در دوره های مختلف ظرفیت های مختلفی را بسته به شرایط برای عرضه و دریافت محصولات در نظر می‌گیرند.
- در آغاز دوره، موجودی مراکز توزیع و مشتری صفر است.

- ورودی ناشناخته است لذا مدل غیرقطعی است.

۲.۳ روش تعیین نقاط کاندید برای احداث تسهیلات جدید

همانطور که پیشتر مطرح شد، شناسایی نقاط کاندید مناسب برای احداث انبارهای سطح شهر و انبار های مرکزی نیازمند به کارگیری یک متدولوژی دقیق است. برای این منظور در پژوهش پیش رو ابتدا بر اساس نظرات خبرگان تعدادی نقاط پیشنهادی تعیین شده است، سپس به کمک روش تاپسیس فازی[۹] نقاط برتر را از میان مکان های تعیین شده به عنوان نقاط کاندید[۱۰] در نظر می گیریم. مراحل روش تاپسیس فازی در ذیل شرح داده شده است. با توجه به اینکه روش تاپسیس فازی یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره است، بنابراین در این روش برای ارزیابی گزینه‌ها تعدادی معیار مد نظر قرار گرفته است و وزن هر یک به کمک روش بهترین-بدترین فازی[۱۱] محاسبه شده است.

۱.۲.۳ تعاریف و مفاهیم

در سال ۱۹۶۵ پروفسور لطفی‌زاده نظریه مجموعه فازی را به عنوان توسعه‌ای بر نظریه کلاسیک مجموعه‌ها مطرح نمودند [۲۶]. مجموعه‌های فازی می‌توانند از تأثیر عدم‌قطعیت در مسائل عملی بکاهند. یک مجموعه فازی $\tilde{a}$ با استفاده از یک زوج (U, m) تعریف می‌گردد که U یک مجموعه و $m : U \to [۰, ۱]$ تابع عضویت مربوط به آن می‌باشد که به صورت $\mu_{a^-}(x)$ نشان داده می‌شود و از این طریق هر x متعلق به مجموعه X به یک عدد حقیقی در بازه[۰, ۱] نگاشت می‌گردد.
یک عدد فازی$\tilde{a}$ در صورتی مثلثی تلقی می‌گردد که تابع عضویت آن $\mu_{\tilde{a}}(x) : R \to [۰, ۱]$

[9] Fuzzy Topsis
[10] Candidate locations
[11] Best-worst method (BWM)

به صورت رابطه (۱) تعریف گردد.

$$\mu_{a^-}(x) = \begin{cases} ۰ & x < l \\ \frac{x-l}{m-l} & l \le x \le m \\ \frac{u-x}{u-m} & m \le x \le u \\ ۰ & x > u \end{cases} \qquad (۱)$$

که l ، m و u به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر پایین، مدل و بالا برای عدد فازی $\tilde{a}$ هستند که هریک اعداد حقیقی هستند و مجموعه‌ی $\tilde{a} = (l, m, u)$ نشان‌دهنده عدد فازی مثلثی است. همچنین درجه ادغام متوسط[۱۲] (GMIR) یا $R(\tilde{a})$ به صورت رابطه (۲) به منظور رتبه بندی عدد فازی $\tilde{a}$ تعریف می گردد[۲۷].

$$R(\tilde{a}_i) = \frac{l_i + ۴m_i + u_i}{۶} \qquad (۲)$$

۲.۲.۳ روش بهترین-بدترین فازی

[۱۳] فرض کنید در یک مسأله تصمیم‌گیری چند معیاره تعداد n معیار به صورت $\{C_۱, \ldots, C_n\}$ مد نظر می‌باشد که بر اساس آنها ماتریس مقایسات زوجی فازی[۱۴] به کمک عبارات کلامی[۱۵] توسط تصمیم‌گیرنده تعریف می‌گردد. عبارات کلامی شامل اهمیت یکسان، اهمیت کم، اهمیت متوسط، بسیار با اهمیت و کاملا با اهمیت می‌باشد. سپس نیاز است تا عبارت کلامی مد نظر تصمیم‌گیرنده به کمک جدول ۱ به اعداد فازی معادل تبدیل گردند [۲۸]. سپس ماتریس مقایسات زوجی $\tilde{O}$ به صورت زیر استخراج می‌گردد:

[12] Graded mean integration representation

[13] Fuzyy best-worst method

[14] Fuzzy pairwise comparison matrix

[15] Linguistic variables

جدول ۱: *قوانین تبدیل عبارات کلامی مورد نظر تصمیم‌گیرنده*

عبارت کلامی	تابع عضویت
اهمیت یکسان	(۱،۱،۱)
بسیار کم اهمیت	(۲/۳،۱،۳/۲)
کم اهمیت	(۲/۵،۲،۲/۳)
بسیار با اهمیت	(۲/۷،۳،۲/۵)
کاملا با اهمیت	(۲/۹،۴،۲/۷)

$$\tilde{O} = \begin{array}{c} \\ c_1 \\ \vdots \\ c_j \\ \vdots \\ c_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} c_1 & \dots & c_j & \dots & c_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} \tilde{o}_{11} & \dots & \tilde{o}_{1j} & \dots & \tilde{o}_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{o}_{j1} & \dots & \tilde{o}_{jj} & \dots & \tilde{o}_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{o}_{n1} & \dots & \tilde{o}_{nj} & \dots & \tilde{o}_{nn} \end{bmatrix} \end{array}$$

که $\tilde{o}_{kj}$ نشان‌دهنده‌ی اهمیت نسبی فازی معیار i در برابر معیار j می‌باشد و زمانی که$k = j$ باشددر این صورت $\tilde{o}_{kj} = (1\ ,\ 1\ ,\ 1)$ می‌باشد. لازم به ذکر است که بر اساس روش بهترین-بدترین نیازی به تعیین تمامی مقادیر درایه‌های ماتریس مقایسات زوجی فازی[16] با اهداف استخراج وزن معیار های نمی‌باشد [۲۹].

گام‌های روش بهترین-بدترین فازی به شرح ذیل می‌باشد [۲۹].

مرحله اول: تعیین ماتریس تصمیم‌گیری

ماتریس تصمیم‌گیری شامل مجموعه‌ای از تصمیمات با هدف ارزیابی عملکرد گزینه‌های مختلف می‌باشد که مقادیر معیارهای تصمیم‌گیری نشان‌دهنده‌ی تفاوت عملکرد گزینه‌ها است. فرض کنید که مجموعه معیارهای تصمیم‌گیری و گزینه ها به ترتیب به صورت $\{C_1, \dots, C_n\}$ و $\{A_1, \dots, A_n\}$ تعریف می‌گردند.

مرحله دوم: تعیین بهترین (با اهمیت‌ترین) و بدترین (کم اهمیت‌ترین) معیارهای تصمیم‌گیری

بر اساس ماتریس تصمیم‌گیری، بهترین و بدترین معیارها باید توسط تصمیم‌گیرنده

[16] Fuzzy pairwise comparison matrix

شناسایی شوند که به ترتیب با C_B و C_W نشان داده می‌شوند.

مرحله سوم: تشکیل ماتریس مقایسات زوجی فازی بین بهترین معیار با سایر معیارها و معیارها با بدترین معیار

در روش بهترین-بدترین مقایسه زوجی $\widetilde{o}_{kj}$شامل k به عنوان بهترین عنصر و c_kبه عنوان بهترین معیار به صورتc_B مد نظر می‌باشد. از سوی دیگر $\widetilde{o}_{kj}$ شامل j به عنوان بدترین عنصر و c_jبه عنوان بدترین معیار به صورتc_w مد نظر می‌باشد. با استفاده از عبارات کلامی مورد نظر تصمیم‌گیرنده، ترجیحات فازی بهترین معیار نسبت به تمامی معیارها و همچنین تمامی معیارها نسبت به بدترین معیار مشخص می‌گردد. در نهایت، ترجیحات فازی حاصل شده به اعداد فازی مثلثی معادل تبدیل می‌گردند و بردار مقایسه بهترین معیار با تمامی معیارها $\widetilde{O}_B = (\widetilde{o}_{B1}, \widetilde{o}_{B2}, ..., \widetilde{o}_{Bn})$ و تمامی معیارها با بدترین معیار $\widetilde{O}_W = (\widetilde{o}_{1W}, \widetilde{o}_{2W}, ..., \widetilde{o}_{nW})$ استخراج می‌گردد. همچنین $\widetilde{o}_{Bj}$ نشان‌دهنده ترجیح فازی میان بهترین معیار c_B با تمامی معیارها و $\widetilde{o}_{kw}$نشان‌دهنده ترجیح فازی میان تمامی معیارها و بدترین معیار c_Wمی‌باشد.

مرحله چهارم: تعیین وزن‌های بهینه فازی

در صورتی که وزن بهینه معیارها به صورت $\tilde{W}^* = (\tilde{w}_1^*, \tilde{w}_2^*, ..., \tilde{w}_n^*)$ و وزن هر معیار j به صورت $\overline{W}_j = (L_j^w, M_j^w, U_j^w)$ در نظر گرفته شود، مدل ریاضی خطی به منظور تعیین مقادیر بهینه وزن های فازی به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\begin{cases} \min \ \widetilde{\xi} \\ \left| \dfrac{\widetilde{W}_B}{\widetilde{W}_j} - \widetilde{a}_{Bj} \right| \le \widetilde{\xi} \\ \left| \dfrac{\widetilde{W}_j}{\widetilde{W}_w} - \widetilde{a}_{jw} \right| \le \widetilde{\xi} \\ \sum_{j=1}^{n} R(\widetilde{W}_j) = 1 \\ L_j^w \le M_j^w \le U_j^w \\ L_j^w \ge 0 \\ j = 1, 2, ..., n \end{cases} \qquad (3)$$

$\tilde{W}_B = (L_B^W, M_B^W, U_B^W),\ \tilde{W}_j = (L_j^W, M_j^W, U_j^W),\ \tilde{W}_w = (L_w^W, M_w^W, U_w^W)$

$\widetilde{a}_{Bj} = (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj}),\ \widetilde{a}_{jw} = (l_{jw}, m_{jw}, u_{jw}),\ \widetilde{\xi} = (l^{\xi}, m^{\xi}, u^{\xi})$

پس از حل مدل وزن‌های فازی به صورت $\tilde{W} = (\tilde{w}_1^*, \tilde{w}_2^*, \tilde{w}_3^*, ..., \tilde{w}_n^*)$ و

$\tilde{W}_j^* = \left(l_j^*, m_j^*, u_j^*\right)$ استخراج می گردند.

۳.۲.۳ روش تاپسیس فازی

همانطور که پیشتر مطرح شد مجموعه نقاط بالقوه برای احداث انبارهای مرکزی و انبارهای سطح شهر ابتدا طبق نظر خبرگان و ملاحظات مدیریتی شناسایی می‌شود. در مرحله بعد به منظور کاهش ابعاد مسأله و افزایش دقت، پس از رتبه‌بندی نقاط بالقوه پیشنهادی، تعداد مشخصی از نقاط بالقوه با اولویت بالا به عنوان نقاط کاندید تعیین می‌گردند [۳۰].

مرحله اول: تعیین ماتریس‌های فازی تصمیم‌گیری و اوزان معیارها

ابتدا تعدادی معیار شامل دسترسی محلی، تراکم جمعیت، حجم ترافیک عبوری، سهولت دریافت مجوز، قیمت زمین و فاصله تا تأمین‌کنندگان و مجموعه نقاط بالقوه برای احداث هر یک از تسهیلات انبار مرکزی و انبار سطح شهر به عنوان گزینه‌ها برای تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شود. در قدم بعدی با استفاده از یک پرسشنامه طراحی شده بر مبنای عبارات کلامی و طیف لیکرت امتیاز هر گزینه i به ازای هر معیار j را در سه سطح بدبینانه، خوشبینانه و محتمل به صورت $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$تعیین می‌نماییم که در نهایت منجر به تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری فازی $\tilde{D}$ می‌گردد. لازم به ذکر است که وزن بهینه معیارها بر اساس روش بهترین-بدترین فازی و به صورت $\tilde{W} = (\tilde{w}_1, \ldots, \tilde{w}_j, \ldots, \tilde{w}_r)$ به ازای تمامی معیار ها و $\tilde{W}_j = (\alpha_j, \beta_j, \chi_j)$ به ازای معیار j ام محاسبه شده است [۲۸]. ماتریس تصمیم‌گیری فازی $\tilde{D}$ به صورت زیر مشخص شده است.

$$\tilde{D} = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} c_1 & \ldots & c_j & \ldots & c_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \ldots & \tilde{x}_{11} & \ldots & \tilde{x}_{11} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{x}_{i1} & \ldots & \tilde{x}_{ij} & \ldots & \tilde{x}_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \ldots & \tilde{x}_{mj} & \ldots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \end{array}$$

مرحله دوم : نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری و محاسبه ماتریس موزون نرمال‌شده

به منظور نرمال‌سازی ماتریس $\tilde{D}$ ابتدا مقادیر حداقل و حداکثر هر ستون j به ترتیب به صورت $\tilde{x}_j^+ = \left(a_j^+, b_j^+, c_j^+\right)$ و $\tilde{x}_j^- = \left(a_j^-, b_j^-, c_j^-\right)$ محاسبه می‌گردد. در صورتی که امتیاز گزینه i به ازای معیار j $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ در نظر گرفته شود با استفاده از روابط زیر به ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده یا $\tilde{N}$ می‌توان دست یافت. درصورتی که $j^+ \in J$ نشان‌دهنده معیار مثبت و $j^- \in J$ نشان‌دهنده معیار منفی باشد، روابط (۴) و (۵) به ترتیب نحوه نرمال‌سازی به ازای معیارهای مثبت و منفی را نشان می‌دهد.

$$\tilde{r}_{ij} = \tilde{x}_{ij}(/)\tilde{x}_j^+ = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{b_j^+}, \frac{c_{ij}}{a_j^+}\right) \qquad \forall\, j^+ \in J \qquad (۴)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \tilde{x}_j^-(/)\tilde{x}_{ij} = \left(\frac{c_j^-}{a_{ij}}, \frac{b_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{c_{ij}}\right) \qquad \forall\, j^- \in J \qquad (۵)$$

$$\tilde{N} = \begin{array}{c} \\ A_۱ \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} c_۱ & \dots & c_j & \dots & c_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} \tilde{r}_{۱۱} & \dots & \tilde{r}_{۱۱} & \dots & \tilde{r}_{۱۱} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{r}_{i۱} & \dots & \tilde{r}_{ij} & \dots & \tilde{r}_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{r}_{m۱} & \dots & \tilde{r}_{mj} & \dots & \tilde{r}_{mn} \end{bmatrix} \end{array}$$

در گام بعدی ماتریس نرمالیزه‌شده فازی $\tilde{N}$را با ضرب در بردار فازی وزن معیارها $\tilde{W} = (\tilde{w}_۱, \dots, \tilde{w}_j, \dots, \tilde{w}_r)$ یا به ازای معیار j $\tilde{W}_j = (\alpha_j, \beta_j, \chi_j)$ را به ماتریس نرمالیزه شده فازی $\tilde{V}$ با درایه‌ی $\tilde{v}_{ij}$ تبدیل می‌گردد که روابط مربوطه به صورت زیر می‌باشند.

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij}(\times)\tilde{w}_j = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{b_j^+}, \frac{c_{ij}}{a_j^+}\right)(\times)\,(\alpha_j, \beta_j, \chi_j) \qquad \forall\, j^+ \in J \qquad (۶)$$

$$= \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+} \times \alpha_j, \frac{b_{ij}}{b_j^+} \times \beta_j, \frac{c_{ij}}{a_j^+} \times \chi_j\right)$$

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij}(\times)\tilde{w}_j = \left(\frac{c_j^-}{a_{ij}}, \frac{b_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{c_{ij}}\right)(\times)\,(\alpha_j, \beta_j, \chi_j) \qquad \forall\, j^- \in J \qquad (۷)$$

$$= \left(\frac{c_j^-}{a_{ij}} \times \alpha_j, \frac{b_j^-}{b_{ij}} \times \beta_j, \frac{a_j^-}{c_{ij}} \times \chi_j\right)$$

$$V = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} c_1 & \dots & c_j & \dots & c_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} \tilde{v}_{11} & \dots & \tilde{v}_{1j} & \dots & \tilde{v}_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{v}_{i1} & \dots & \tilde{v}_{ij} & \dots & \tilde{v}_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{v}_{m1} & \dots & \tilde{v}_{mj} & \dots & \tilde{v}_{mn} \end{bmatrix} \end{array}$$

مرحله سوم: تعیین ایده‌آل‌های مثبت و منفی و میزان انحراف از آنها و در نهایت محاسبه ضریب نزدیکی

در این مرحله ابتدا نیاز به تعیین ایده‌آل‌های مثبت [۱۷] و منفی[۱۸] داریم که به ترتیب به صورت I^+و I^-نشان داده می‌شوند. در حالت فازی جهت مقایسه اعداد فازی و تعیین $\tilde{v}_j^+$ و $\tilde{v}_j^-$، از فرآیند رتبه‌بندی فازی استفاده می‌گرددکه این امر با کمک رتبه عددی فازی $\tilde{v}_{ij}$ یا$M(\tilde{v}_{ij})$ قابل انجام می‌باشد.

$$M(v_{ij}) = \frac{-a_{ij}^2+c_{ij}^2+a_{ij}b_{ij}+c_{ij}b_{ij}}{3(-a_{ij}+c_{ij})} \qquad \forall i \in I,\, \forall j \in J \qquad (8)$$

پس از محاسبه‌ی $M(\tilde{v}_{ij})$ها به ازای هر معیار j ، $\tilde{v}_{ij}$ با بیشترین مقدار $M(\tilde{v}_{ij})$ به عنوان $\tilde{v}_j^+$ و همچنین $\tilde{v}_{ij}$ با کمترین مقدار $M(\tilde{v}_{ij})$ به عنوان$\tilde{v}_j^-$ در نظر گرفته می‌شود. سپس میزان فاصله هر گزینه نسب به ایده‌آل‌های مثبت و منفی (S_i^+ و S_i^-)به کمک روابط (۱۱) و (۱۲) و بر اساس فاصله بین دو عدد فازی ارائه‌شده در قالب روابط (۹) و (۱۰) توسط پروفسور لطفی‌زاده [۲۶] محاسبه می‌شود.

$$D_{ij}^+ = 1 - \sup_x \left\{ \min \left[\alpha_{v_{ij}}(x),\, \alpha_{v_{j^+}}(x) \right] \right\} \qquad \forall i \in I,\, \forall j \in J \qquad (9)$$

$$= \begin{cases} 1 - \frac{c_{ij}-a^+}{b^+ + c_{ij} - a^+ - b_{ij}} & (b_{ij} < b^+) \\ 1 - \frac{c_{ij}-a^+}{b_{ij} + c^+ - a_{ij} - b^+} & (b^+ < b_{ij}) \end{cases}$$

$$D_{ij}^- = 1 - \sup_x \left\{ \min \left[\alpha_{v_{ij}}(x),\, \alpha_{v_{j^-}}(x) \right] \right\} \qquad \forall i \in I,\, \forall j \in J \qquad (10)$$

$$= \begin{cases} 1 - \frac{c^- - a_{ij}}{b_{ij} + c^- - a_{ij} - b^-} & (b^- < b_{ij}) \\ 1 - \frac{c_{ij}-a^-}{b^- + c_{ij} - a^- - b_{ij}} & (b_{ij} < b^-) \end{cases}$$

[17] Positive ideal solution (PIS)

[18] Negative ideal solution (NIS)

$$S_i^- = \sum_{j=1}^{n} D_{ij}^- \qquad \forall i \in I \qquad (۱۱)$$

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^{n} D_{ij}^+ \qquad \forall i \in I \qquad (۱۲)$$

در نهایت ضریب نزدیکی نسبی هر گزینه به ایده‌آل‌ها (CC_i) محاسبه می‌گردد و پس از مرتب کردن این ضرایب به ترتیب نزولی، اولویت انتخاب گزینه‌ها حاصل می‌گردد [۳۱].

$$CC_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \qquad \forall i \in I \qquad (۱۳)$$

۴ مدلسازی ریاضی

۱.۴ اندیس ها

I	مجموعه مراکز توزیع	$i \in I$
J	مجموعه نقاط بالقوه برای احداث انبارهای سطح شهر	$j \in J$
K	مجموعه خانواده محصولات	$k \in K$
L	مجموعه مناطق مشتری	$l \in L$
M	مجموعه نقاط بالقوه برای احداث انبارهای مرکزی	$m \in M$
R	مجموعه مسیرهای در دسترس میان تسهیلات	$r \in R$
S	مجموعه تأمین‌کنندگان	$s \in S$
T	مجموعه دوره‌های افق برنامه‌ریزی	$t \in T$

۲.۴ پارامترها و اسکالرها

Q	حداکثر تعداد انبار سطح شهر که می‌تواند احداث شود
W	حداکثر تعداد انبار مرکزی که می‌تواند احداث شود
$\tilde{f}_U^j$	هزینه ثابت استقرار یک انبار سطح شهر در محل کاندید j
$\tilde{f}_C^m$	هزینه ثابت استقرار یک انبار مرکزی در محل کاندید m
$\tilde{S}_C^{mt}$	ظرفیت نگهداری انبار مرکزی m در دوره t
$\tilde{S}_U^{jt}$	ظرفیت نگهداری انبار سطح شهر j در دوره t
$\tilde{S}_D^{it}$	ظرفیت نگهداری توزیع‌کننده i در دوره t
$\tilde{P}_S^{kst}$	ظرفیت عرضه کالای k در تأمین‌کننده s در دورهt
$\tilde{P}_C^{kmt}$	ظرفیت عرضه کالای k در انبار مرکزی m در دوره t
$\tilde{P}_U^{kjt}$	ظرفیت عرضه کالای k در انبار سطح شهر j در دورهt
$\tilde{P}_D^{kit}$	ظرفیت عرضه کالای k در توزیع‌کننده i برای در دوره t
$\tilde{N}_{kmt}$	ظرفیت دریافت کالای k در انبار مرکزی m در دوره t
$\tilde{N}_{kjt}$	ظرفیت دریافت کالای k در انبار سطح شهر j در دورهt
$\tilde{N}_{kit}$	ظرفیت دریافت کالای k در توزیع‌کننده i در دوره t
$\tilde{D}_{lkt}$	تقاضای کالای k در منطقه مشتری l در دوره t
$\tilde{H}_{kjt}$	هزینه نگهداری هر واحد کالای k در محل انبار سطح شهر j در دوره t
$\tilde{H}_{kit}$	هزینه نگهداری هر واحد کالای k در مرکز توزیعi در دورهt
$\tilde{H}_{kmt}$	هزینه نگهداری هر واحد کالای k در محل انبار مرکزی m در دورهt
$\tilde{C}_{ksmrt}$	هزینه حمل و نقل کالای k از تأمین‌کننده s به انبار مرکزی m از طریق مسیر r در دوره t
$\tilde{C}_{kmjrt}$	هزینه حمل و نقل کالای k از انبار مرکزی m به انبار سطح شهر j از طریق مسیر r در دوره t
$\tilde{C}_{kjirt}$	هزینه حمل و نقل کالای k از انبار سطح شهر j به مرکز توزیع i از طریق مسیر r در دوره t
$\tilde{C}_{kilrt}$	هزینه توزیع کالای k از مرکز توزیع i به منطقه مشتری l از طریق مسیر r دردوره t
$S\tilde{H}C_{klt}$	هزینه کمبود هر واحد محصول k به ازای منطقه مشتری l در دوره t
$\tilde{\phi}_j$	اثر زیست محیطی ناشی از احداث یک انبار سطح شهر در محل کاندید j
$\tilde{\lambda}_m$	اثر زیست محیطی ناشی از احداث یک انبار مرکزی در محل کاندید m
$\tilde{\alpha}_{smr}$	اثر زیست محیطی ناشی از انتقال یک واحد از محصولات از تأمین‌کنندهs به انبار مرکزیm از طریق مسیر r
$\tilde{\beta}_{mjr}$	اثر زیست محیطی ناشی از انتقال یک واحد از انبار مرکزی m به انبار سطح شهر j از طریق مسیر r
$\tilde{\chi}_{jir}$	اثر زیست محیطی ناشی از انتقال یک واحد از انبار سطح شهر j به توزیع‌کننده i از طریق مسیر r
$\tilde{\delta}_{ilr}$	اثر زیست محیطی ناشی از انتقال یک واحد از توزیع‌کننده i به منطقه مشتری l از طریق مسیر r
V_k	حجم یک واحد محصول نوع k
d_{sm}	فاصله بین تأمین‌کننده s و انبار مرکزی m
d_{mj}	فاصله بین انبار مرکزی m و انبار سطح شهر j
d_{ji}	فاصله بین و انبار سطح شهر j و مرکز توزیع i
d_{il}	فاصله بین مرکز توزیع i و منطقه مشتری l
Ψ	عدد مثبت به اندازه کافی بزرگ

۳.۴ متغیرهای تصمیم‌گیری

R_{SC}^{ksmrt} میزان کالای k انتقال‌یافته از تأمین‌کننده s به انبار مرکزی m از طریق مسیر r در دوره t
R_{CU}^{kmjrt} میزان کالای k انتقال‌یافته از انبار مرکزی m به انبار سطح شهر j از طریق مسیر r در دوره t
R_{UD}^{kjirt} میزان کالای k انتقال‌یافته از انبار سطح شهرj به مرکز توزیع i از طریق مسیر r در دوره t
R_{DZ}^{kilrt} میزان کالای k انتقال‌یافته از مرکز توزیع i به منطقه مشتری l از طریق مسیر r در دوره t
A_{C}^{kmt} میزان موجودی کالای k در انبار مرکزی m در انتهای دوره t
A_{U}^{kjt} میزان موجودی کالای k در انبار سطح شهر j در انتهای دوره t
A_{D}^{kit} میزان موجودی کالای k در مرکز توزیع i در انتهای دوره t
SH_{klt} میزان کمبود کالای k در منطقه مشتری l در دوره t
O_{C}^{m} متغیر صفر و یک نشان‌دهنده استقرار یا عدم استقرار انبار مرکزی در محل m
O_{U}^{j} متغیر صفر و یک نشان‌دهنده استقرار یا عدم استقرار انبار سطح شهر در محل j
X_{SC}^{smr} متغیر صفر و یک نشان‌دهنده تخصیص انبار مرکزی m به به تأمین‌کننده s از طریق مسیر r
X_{CU}^{mjr} متغیر صفر و یک نشان‌دهنده تخصیص انبار سطح شهر j به انبار مرکزی m از طریق مسیر r
X_{UD}^{jir} متغیر صفر و یک نشان‌دهنده تخصیص توزیع‌کننده i به انبار سطح شهر j از طریق مسیر r
X_{DZ}^{ilr} متغیر صفر و یک نشان‌دهنده تخصیص مشتری منطقه l به مرکز توزیع i از طریق مسیر r

در این مسأله تمامی توزیع‌کنندگان و نواحی مشتری ثابت و مشخص هستند و نیازی به فعالسازی آنها نیست و به بیانی دیگر متغیر فعالسازی آنها برابر ۱ می‌باشد.

۴.۴ توابع هدف

در این پژوهش سه هدف شامل حداقل هزینه کل، حداقل مجموع اثرات زیست‌محیطی و حداقل حداکثر کمبود میان مناطق مشتری (عدالت در توزیع) در نظر گرفته شده است. تابع هدف (۱۴)، کمینه شدن هزینه‌ها را تضمین می‌کند که هزینه کل به ترتیب شامل مجموع هزینه‌های ثابت احداث، هزینه‌های حمل و نقل میان تسهیلات، هزینه‌های نگهداری و هزینه‌های فروش از دست رفته می‌باشد. با توجه به اینکه بودجه محدودی برای فعالیت زنجیره توزیع و به خصوص احداث تسهیلات جدید وجود دارد، بنابراین هزینه اصلی‌ترین هدف در مسأله پیش روی می‌باشد. تابع هدف (۱۵)، شامل حداقل کردن مجموع اثرات زیست‌محیطی ثابت و متغیر می‌باشد. اثرات زیست محیطی ثابت ناشی از احداث تسهیلات جدید هستند و از سوی دیگر اثرات زیست محیطی متغیر نیز ناشی از حمل و نقل میان تسهیلات شبکه می‌باشند، لازم به ذکر است که اثرات زیست محیطی واحد به صورت میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای مضر در نظر گرفته شده اند که مقادیر پارامترهای زیست محیطی به کمک نرم افزار سیما پرو [۱۹] قابل محاسبه هستند. در نظر گرفتن دو تابع هدف حداقل هزینه و اثرات زیست‌محیطی کل به طور همزمان سبب شده است که مفاهیم زنجیره‌تأمین سبز در این پژوهش در نظر گرفته شود.. تابع

[19] SimaPro

هدف (۱۶) به حداقل کردن حداکثر کمبود میان مناطق مشتری محصولات و برقراری عدالت در توزیع می‌پردازد. در واقع در این تابع هدف تلاش شده است که در صورت وقوع کمبود محصولات در مناطق مشتری، آسیب این کمبود میان مناطق مختلف تقسیم شود و از این طریق عدالت در توزیع محصولات رعایت گردد.

$$Min\ Z_1 = \begin{bmatrix} \sum_{j\in J} \tilde{f}_U^j O_U^j + \sum_{m\in M} \tilde{f}_C^m O_C^m + \sum_{k\in K}\sum_{s\in S}\sum_{m\in M}\sum_{r\in R}\sum_{t\in T} \tilde{C}_{ksmrt}\, d_{sm} R_{SC}^{ksmrt} \\ + \sum_{k\in K}\sum_{m\in M}\sum_{j\in J}\sum_{r\in R}\sum_{t\in T} \tilde{C}_{kmjrt}\, d_{mj} R_{CU}^{kmjrt} \\ + \sum_{k\in K}\sum_{j\in J}\sum_{i\in I}\sum_{r\in R}\sum_{t\in T} \tilde{C}_{kjirt}\, d_{ji} R_{UD}^{kjirt} \\ + \sum_{k\in K}\sum_{i\in I}\sum_{l\in L}\sum_{r\in R}\sum_{t\in T} \tilde{C}_{kilrt}\, d_{il} R_{DZ}^{kilrt} + \sum_{k\in K}\sum_{m\in M}\sum_{t\in T} \tilde{H}_{kmt} A_C^{kmt} \\ + \sum_{k\in K}\sum_{j\in J}\sum_{t\in T} \tilde{H}_{kjt} A_U^{kjt} \\ + \sum_{k\in K}\sum_{i\in I}\sum_{t\in T} \tilde{H}_{kit} A_D^{kit} \\ + \sum_{k\in K}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T} S\tilde{H}C_{klt} SH_{klt} \end{bmatrix} \quad (۱۴)$$

$$Min\ Z_2 = \begin{bmatrix} \sum_{j\in J} \tilde{\phi}_j O_U^j + \sum_{m\in M} \tilde{\lambda}_m O_C^m + \sum_{k\in K}\sum_{s\in S}\sum_{m\in M}\sum_{r\in R}\sum_{t\in T} \tilde{\alpha}_{smr} R_{SC}^{ksmrt} \\ + \sum_{k\in K}\sum_{m\in M}\sum_{j\in J}\sum_{t\in T} \tilde{\beta}_{mjr} R_{CU}^{kmjrt} + \sum_{k\in K}\sum_{j\in J}\sum_{i\in I}\sum_{r\in R}\sum_{t\in T} \tilde{\chi}_{jir} R_{UD}^{kjirt} \\ + \sum_{k\in K}\sum_{i\in I}\sum_{l\in L}\sum_{r\in R}\sum_{t\in T} \tilde{\delta}_{ilr} R_{DZ}^{kilrt} \end{bmatrix} \quad (۱۵)$$

$$Min \underset{l\in L}{Max} \sum_{k\in K}\sum_{t\in T} SH_{klt} \quad (۱۶)$$

۵.۴ محدودیت ها

محدودیت‌های (۱۷) تا (۱۹) بیانگر تخصیص یگانه میان تسهیلات مختلف هستند.

$$\sum_{s\in S} X_{SC}^{smr} \le 1 \qquad \forall m \in M, r \in R \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{m\in M} X_{CU}^{mjr} \le 1 \qquad \forall j \in J, r \in R \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{j\in J} X_{UD}^{jir} \le 1 \qquad \forall i \in I, r \in R \qquad (۱۹)$$

محدودیت‌های (۲۰) و (۲۱) بیانگر حداکثر تعداد انبارهای مرکزی و سطح شهر قابل احداث می‌باشد.

$$\sum_{j\in J} O_U^j \le Q \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{m\in M} O_C^m \le W \qquad (۲۱)$$

محدودیت‌های (۲۲) تا (۲۵) بیان می‌کنند که تا زمانی که تسهیلات در سطوح مختلف احداث نشده باشند، تخصیصی میان آنها صورت نخواهد گرفت.

$$X_{SC}^{smr} \leq O_C^m \qquad \forall s \in S, \forall m \in M, r \in R \qquad (۲۲)$$

$$X_{CU}^{mjr} \leq O_C^m \qquad \forall m \in M, \forall j \in J, r \in R \qquad (۲۳)$$
$$X_{CU}^{mjr} \leq O_U^j \qquad \forall m \in M, \forall j \in J, r \in R \qquad (۲۴)$$
$$X_{UD}^{jir} \leq O_U^j \qquad \forall j \in J, \forall i \in I, r \in R \qquad (۲۵)$$

محدودیت‌های (۲۶) تا (۳۵) بر لزوم رعایت ظرفیت پذیرش، عرضه و نگهداری محصولات در تسهیلات موجود و همچنین احداث‌شده مختلف تأکید دارند. محدودیت‌های

$$\sum_{(m\in M, r\in R)} R_{SC}^{ksmrt} \leq \tilde{P}_S^{kst} \qquad \forall k \in K, s \in S, t \in T \qquad (۲۶)$$
$$\sum_{(j\in J, r\in R)} R_{CU}^{kmjrt} \leq \tilde{P}_C^{kmt} O_C^m \qquad \forall k \in K, m \in M, t \in T \qquad (۲۷)$$
$$\sum_{(i\in I, r\in R)} R_{UD}^{kjirt} \leq \tilde{P}_U^{kjt} O_U^j \qquad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \qquad (۲۸)$$
$$\sum_{(l\in L, r\in R)} R_{DZ}^{kilrt} \leq \tilde{P}_D^{kit} \qquad \forall k \in K, \forall i \in I, \forall t \in T \qquad (۲۹)$$
$$\sum_{(s\in S, r\in R)} R_{SC}^{ksmrt} \leq \tilde{N}_C^{kmt} O_C^m \qquad \forall k \in K, m \in M, t \in T \qquad (۳۰)$$
$$\sum_{(m\in M, r\in R)} R_{CU}^{kmjt} \leq \tilde{N}_U^{kjt} O_U^j \qquad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \qquad (۳۱)$$
$$\sum_{(j\in J, r\in R)} R_{UD}^{kjit} \leq \tilde{N}_D^{kit} \qquad \forall k \in K, \forall i \in I, \forall t \in T \qquad (۳۲)$$
$$\sum_{k\in K} V_k A_C^{kmt} \leq \tilde{S}_C^{mt} O_C^m \qquad \forall m \in M, t \in T \qquad (۳۳)$$
$$\sum_{k\in K} V_k A_U^{kjt} \leq \tilde{S}_U^{jt} O_U^j \qquad \forall j \in J, \forall t \in T \qquad (۳۴)$$
$$\sum_{k\in K} V_k A_D^{kit} \leq \tilde{S}_D^{it} \qquad \forall i \in I, \forall t \in T \qquad (۳۵)$$

(۳۶) تا (۳۹) تضمین می‌کنند که در صورتی که تسهیلات دو سطح به یکدیگر تخصیص نیابند، جریانی میان آنها انتقال نیابد.

محدودیت‌های (۴۰) تا (۴۲) نشان‌دهنده معادلات تعادل موجودی در تسهیلات مختلف هستند.

$$A_C^{kmt} = A_C^{kmt-1} + \sum_{(s\in S, r\in R)} R_{SC}^{ksmrt} - \sum_{(j\in J, r\in R)} R_{CU}^{kmjrt} \qquad \forall k \in K, \forall m \in M \forall t \in T \qquad (۴۰)$$
$$A_U^{kjt} = A_U^{kjt-1} + \sum_{(m\in M, r\in R)} R_{CU}^{kmjrt} - \sum_{(i\in I, r\in R)} R_{UD}^{kjirt} \qquad \forall k \in K, \forall j \in J \forall t \in T \qquad (۴۱)$$
$$A_D^{kit} = A_D^{kit-1} + \sum_{(j\in J, r\in R)} R_{UD}^{kjit} - \sum_{(l\in L, r\in R)} R_{DZ}^{kilt} \qquad \forall k \in K, \forall i \in I, \forall t \in T \qquad (۴۲)$$

محدودیت (۴۳) مربوط به شرط ارضای تقاضای محصولات در مناطق مشتری می‌باشد. محدودیت‌های (۴۴) و (۴۵) شرط لازم برای متغیرهای نامنفی و صفر و یک را

$$\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} R_{SC}^{ksmrt} \le \Psi\, X_{SC}^{smr} \qquad \forall s \in S, \forall m \in M, \forall r \in R \qquad (۳۶)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} R_{CU}^{kmjrt} \le \Psi\, X_{CU}^{mjr} \qquad \forall m \in M, \forall j \in J, \forall r \in R \qquad (۳۷)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} R_{UD}^{kjirt} \le \Psi\, X_{UD}^{jir} \qquad \forall j \in J, \forall i \in I, \forall r \in R \qquad (۳۸)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} R_{DZ}^{kilrt} \le \Psi\, X_{DZ}^{ilr} \qquad \forall i \in I, \forall l \in L, \forall r \in R \qquad (۳۹)$$

$$\sum_{(i\in I, r\in R)} R_{DZ}^{kilrt} + SH_{klt} = \tilde{D}_{klt} \qquad \forall k \in K, \forall l \in L, \forall t \in T \qquad (۴۳)$$

در نظر می‌گیرد.

$$\mathrm{R}_{SC}^{ksmrt}, R_{CU}^{kmjrt}, R_{UD}^{kjirt}, R_{DZ}^{kilrt}, A_{C}^{kmt}, A_{U}^{kjt}, A_{D}^{kit}, SH_{klt} \ge ۰ \qquad \forall k \in K, \forall s \in S, \forall m \in M, \forall j \in J, \forall i \in I, \forall l \in L, \forall r \in R, \forall t \in T \qquad (۴۴)$$

$$\mathrm{O}_{C}^{m}, O_{U}^{j}, X_{SC}^{smr}, X_{CU}^{mjr}, X_{UD}^{jir}, X_{DZ}^{ilr} \in \{۰, ۱\} \qquad \forall s \in S, \forall m \in M, \forall j \in J, \forall i, \in I, \forall l \in L, \forall r \in R, \forall t \in T \qquad (۴۵)$$

۵ روش حل

۱.۵ روش حل مسأله به صورت چند هدفه

به کمک برنامه‌ریزی چند هدفه[۲۰] قادر خواهیم بود که چندین تابع هدف مختلف را بر اساس یک ناحیه شدنی مشخص بهینه‌سازی کنیم. روش‌های متعددی برای تبدیل یک مسأله چند هدفه به مسأله تک‌هدفه معادل نظیر مجموع وزنی[۲۱]، برنامه‌ریزی آرمانی[۲۲]، مدل‌های الفبایی یا لکسیکوگرافی[۲۳]، ϵ –محدودیت[۲۴] و غیره وجود دارد. در این پژوهش روش محدودیت اپسیلون برای تبدیل مسأله‌ی چند هدفه به یک مسأله معادل تک‌هدفه به کار گرفته شده است. یک مزیت منحصر به فرد روش مذکور در این است که شمار راه حل‌های کارآمد می‌تواند به راحتی کنترل شود. این رویکرد روشی قدرتمند با موفقیت اثبات شده در حل مسائل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح خطی[۲۵] و چند هدفه نظیر

[20] Multi-objective programming

[21] LP-Metric

[22] Goal programming

[23] lexicographic models

[24] ϵ-constraint

[25] multi-objective mixed-integer linear programming problems

طراحی شبکه‌ی زنجیره‌تأمین می‌باشد [۳۲].
برای حل مدل سه هدفه ارائه شده در این پژوهش از روش محدودیت اپسیلون[۲۶] استفاده شده است. در مسائل چند هدفه[۲۷] اهداف به صورت حداقل‌سازی و حداکثرسازی وجود دارند که به منظور حل مسائل چند هدفه به روش محدودیت اپسیلون ابتدا باید هدف با بالاترین اولویت انتخاب شود و به عنوان هدف اصلی مسأله در نظر گرفته شود. سپس برای اهداف باقی‌مانده حدود اپسیلونی قابل قبولی تعریف شود تا از این طریق مسأله چندهدفه به معادل تک هدفه تبدیل گردد [۳۳]. برای انجام این کار هدف اصلی در جایگاه تابع هدف قرار می‌گیرد و سایر اهداف به محدودیت وارد می‌شوند و برای اهداف حداکثرسازی حدود پایین اپسیلونی و برای اهداف حداقل‌سازی حدود بالا اپسیلونی منظور می‌گردد. به بیان ریاضی روش محدودیت اپسیلون به شرح ذیل می‌باشد:
فرض کنید که یک مسأله چند هدفه به شکل کلی به صورت زیر تعریف گردد.

$$\begin{aligned} &Min\ \ f_1 ... f_k, ..., f_{j-1} \\ &Max\ \ f_j ..., f_m \\ &S.t : X \in \Omega \end{aligned} \qquad (۴۶)$$

توجه کنید که Ω بیانگر فضای موجه مسأله می‌باشد که با استفاده از محدویت‌های تساوی یا نامساوی تعریف می‌گردد. اگر تابع هدف f_k به عنوان با اهمیت‌ترین تابع هدف در مسأله چند هدفه شناسایی شده باشد و مقادیرεهمان حدود اپسیلونی برای سایر اهداف باشند، بنابراین مسأله چند هدفه با استفاده از روش محدودیت اپسیلون به صورت زیر حل می‌گردد، لازم به ذکر است که رویکردهای مختلفی برای تعیین مقدار اپسیلون متناظر با هر هدف وجود دارد.

$$\begin{aligned} &Min\ \ f_k \\ &f_1 \ \leq\ \varepsilon_1 \quad , ..., \ f_{k-1} \leq \varepsilon_{k-1} \\ &f_{k+1} \leq \varepsilon_{k+1} \ , ..., \ f_{j-1} \leq \varepsilon_{j-1} \\ &f_j \geq \varepsilon_j \ , ... , \quad f_n \ \geq \varepsilon_m \\ &X \in \Omega \end{aligned} \qquad (۴۷)$$

[26] ϵ- constraint
[27] Multi-objective problems

برای به دست آوردن مجموعه‌ی مرز پارتویی، بردار حدود بالا و پایین اپسیلونی باید در حول مرز پارتویی برای هر یک از اهداف تغییر کند و از این طریق هر بار یک مجموعه جدید حدود اپسیلونی ساخته شود.
با توجه به ضعف روش اپسیلون محدودیت پایه در تولید جواب‌های قوی، اگر در مسأله برنامه‌ریزی چند هدفه شناسایی اهداف حداکثرسازی به حداقل‌سازی تبدیل شوند و بردارϵ نشان‌دهنده‌ی حدود اپسیلونی برای سایر اهداف باشد، بنابراین مسأله چند هدفه با استفاده از روشϵ- محدودیت توسعه یافته به صورت زیر به معادل تک هدفه تبدیل می‌گردد [۳۴]:

$$
\begin{aligned}
&Min\,(f_g(x) - \delta \times (\tfrac{s_1}{r_1} + \tfrac{s_2}{r_2} + ... + \tfrac{s_{g-1}}{r_{g-1}} + \tfrac{s_{g+1}}{r_{g+1}} + ... + \tfrac{s_m}{r_m})\\
&S.t:\\
&f_1(x) + s_1 = \varepsilon_1\\
&f_2(x) + s_2 = \varepsilon_2\\
&\vdots\\
&f_{g-1}(x) + s_{g-1} = \varepsilon_{g-1}\\
&f_{g+1}(x) + s_{g+1} = \varepsilon_{g+1}\\
&\vdots\\
&f_m(x) + s_m = \varepsilon_m\\
&s_i \in R^+ \quad x \in \Omega
\end{aligned}
\tag{۴۸}
$$

نحوه محاسبه‌ی دامنه‌ی دامنه تابع هدف i ام در تکرار k به صورت رابطه‌ی (۴۹) می‌باشد.

$$
\begin{aligned}
&Range_i = r_i = f_i^{\max} - f_i^{\min};\\
&\varepsilon_i^k = f_i^{\max} - \tfrac{r_i}{n_i} \times k; \qquad \forall i \neq 1, \forall k = 1, ..., n_i - 1
\end{aligned}
\tag{۴۹}
$$

الگوریتم محدودیت اپسیلون تقویت‌شده از حالت آزاد شروع می‌کند و به مرور فضای جواب را محدود می‌کند. به این معنی که برای مسئله حداقل‌سازی ابتدا از بیشترین مقادیر سمت راست (حدود اپسیلونی) آغاز کرده و در تکرارهای بعد به مرور مقادیر سمت راست را کاهش می‌دهد [۳۵].

۲.۵ خطی‌سازی

همانطور که در بخش‌های قبل مطرح گردید، تابع هدف (۱۶) به صورت حداقل کردن حداکثر کمبود در میان مناطق مشتری در نظر گرفته شده است که این تابع هدف یک عبارت غیرخطی است که منجر به افزایش نمایی پیچیدگی مسأله و زمان حل می‌گردد. از این رو نیاز است که با بهره‌گیری از یک متغیر کمکی و به کارگیری روش مناسب این عبارت غیرخطی را با معادل‌های خطی جایگزین نماییم [۳۶]. برای خطی‌سازی تابع هدف (۱۶) تنها کافی است که این عبارت با روابط زیر جایگزین شود.

$$Min \ \ YY$$
$$\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} SH_{klt} \ \leq \ YY \qquad k \in K, t \in T$$

۳.۵ به کارگیری روش استوار امکانی به منظور مقابله با عدم‌قطعیت

در این پژوهش از روش استوارسازی امکانی[۲۸] به منظور مقابله با ریسک عملیاتی ناشی از تغییرات ناگهانی محیط کسب و کار، مدل کردن عدم قطعیت موجود در هزینه‌های احداث، هزینه‌های متغیر، تقاضاها، ظرفیت‌ها و سایر پارامترهای مدل طراحی شبکه توزیع بهره گرفته شده است. برای این منظور پژوهش صورت گرفته در سال ۲۰۱۲ توسط پیشوایی و همکاران[۲۹] مورد استفاده قرار گرفته است [۳۷]. استوارسازی در مدل مسأله بر اساس رویکرد سهل گیرانه انجام شده است که پس از تبدیل مسأله چند هدفه به معادل تک هدفه فرآیند استوارسازی صورت پذیرفته است. پس از استوار سازی مسأله تابع هدف مقداری افزایش را متحمل شد اما در عوض کمبودهای موجود در هر یک از مناطق مشتری به طرز چشمگیری کاهش پیدا کرد. لازم به ذکر است که استواری در کل محدودیت‌های ساختاری و اپسیلونی اعمال شده است اما تنها مهم‌ترین تابع هدف یا به بیانی حداقل کردن هزینه‌های سیستم توزیع را استوار شده است. بر اساس متدولوژی پژوهش هر یک از هزینه های ثابت احداث و هزینه‌های متغیر واحد، ظرفیتها و تقاضاها

[28] Possibilistic Robust

[29] Pishvaee

به صورت اعداد فازی مثلثی در نظر گرفته شده است و امید ریاضی فازی آنها پس از فازی‌زدایی در تابع هدف به کار گرفته شدند. در پژوهش پیش روی برای محدودیت‌های کوچکتر مساوی ضریب اطمینان β و محدودیت‌های بزرگتر مساوی ضریب اطمینان α به صورت متغیر در نظر گرفته شده است که هر دو مقادیری بین ۰ تا ۱ اختیار می‌کنند. بسته به اینکه با رویکرد سهل گیرانه یا سخت‌گیرانه مدلسازی استواری صورت گرفته است، هر یک از محدودیت‌ها به مقتضای رویکرد به شکل دیگری بیان خواهند شد. همچنین در برخی از محدودیت‌ها با توجه به اینکه سمت راست در یک متغیر فعالسازی صفر و یک ضرب شده بود، شرایط غیر خطی ضرب عدد باینری در عدد پیوسته به وجود آمده است که پس از خطی‌سازی در مدل اعمال شده است. مدل استوار شده بر اساس مسأله معادل تک هدفه در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است که در این پژوهش استوارسازی هم به صورت جزئی و هم به صورت کلی انجام شده است که نتایج و مدل در ادامه ارائه می‌گردد. در مدل استوار کامل تمامی پارامترهای تقاضا و ظرفیت مرتبط با مدل استوار شده‌اند، در حالی که در مدل استوار جزئی تنها پنج پارامتر با اهمیت و حیاتی از نظر مدیریت سازمان شامل تقاضای محصولات، ظرفیت عرضه در انبار مرکزی، ظرفیت عرضه در انبار سطح شهر، ظرفیت دریافت و عرضه توزیع‌کننده استوار شده‌اند و خروجی‌های هر کدام از این مدل‌ها در قسمت نتایج مقایسه شده است. مسأله پیش رو به صورت کلی به شکل زیر مدل‌سازی شده است:

$$
\begin{aligned}
&Min\ Z = FY + CX \\
&S.t: \\
&A_1X \geq \overline{D_1} \qquad A_2X \geq \overline{D_2}Y \\
&B_1X \leq \overline{S_1} \qquad B_2X \leq \overline{S_2}Y \\
&C_1X \leq \overline{P_1} \qquad C_2X \leq \overline{P_2}Y \\
&Y \in \{0,1\} \qquad X \geq 0
\end{aligned}
$$

در صورتی که بخواهیم مدل استوار مسأله فوق را به روش استوارسازی امکانی پیاده کنیم، تابع هدف پس از فرآیند خطی‌سازی به صورت زیر خواهد بود:

$$
\begin{aligned}
&Min\ E[z] = \left(\frac{f_{(1)}+f_{(2)}+f_{(3)}}{3}\right)y + \left(\frac{C_{(1)}+C_{(2)}+C_{(3)}}{3}\right)x + \gamma(Z_{\max} - Z_{\min}) \\
&+\delta[(d1_{(2)} - d^{1}_{(1)} - (1-\alpha)d^{1}_{(2)}) + (V_1.d^{2}_{(2)} - V_1.d^{1}_{(1)} - (y-V_1)d^{2}_{(2)})] \\
&+\pi\Big[(\beta S^{1}_{(3)} + (1-\beta)S^{1}_{(2)} - S^{1}_{(2)}) + (V_2.S^{2}_{(3)} + (y-V_2)S^{2}_{(2)} - S^{2}_{(2)}.y) \\
&+(\beta P^{1}_{(3)} + (1-\beta)P^{1}_{(2)} - P^{1}_{(2)}) + (V_3 P^{2}_{(3)} + (y-V_3)P^{2}_{(2)} - P^{2}_{(2)}.y)]
\end{aligned}
\qquad (50)
$$

مجموعه‌ی محدودیت‌ها پس از خطی‌سازی به صورت زیر می‌باشد:

$$
\begin{aligned}
&POS\left\{A^1 x \geq \tilde{d}^1\right\} \geq \alpha \quad \Rightarrow \quad A^1 x \geq \alpha\, d^1_{(1)} + (1-\alpha)\, d^1_{(2)} \\
&POS\left\{A^2 x \geq \tilde{d}^2.y\right\} \geq \alpha \quad \Rightarrow \quad A^2 x \geq (\alpha\, d^2_{(1)} + (1-\alpha)\, d^2_{(2)})y \\
&\qquad\qquad \xrightarrow{\alpha.y = V_1} A^2 x \geq V_1.d^2_{(1)} + (y-V_1)\, d^2_{(2)} \\
&POS\left\{B^1 x \leq \tilde{S}^1\right\} \geq \beta \quad \Rightarrow \quad B^1 x \leq \beta\, S^1_{(3)} + (1-\beta)\, S^1_{(2)} \\
&POS\left\{B^2 x \leq \tilde{S}^2.y\right\} \geq \beta \quad \Rightarrow \quad B^2 x \leq (\beta\, S^2_{(3)} + (1-\beta)\, S^2_{(2)})y \\
&\qquad\qquad \xrightarrow{\beta.y = V_2} B^2 x \leq V_2.\, S^2_{(3)} + (y-V_2)\, S^2_{(2)} \\
&POS\left\{C^1 x \leq \tilde{P}^1\right\} \geq \beta \qquad C^1 x \leq \beta\, P^1_{(3)} + (1-\beta)\, P^1_{(2)} \\
&POS\left\{C^2 x \leq \tilde{P}^2.y\right\} \geq \beta \quad C^2 x \leq (\beta\, P^2_{(3)} + (1-\beta)\, P^2_{(2)})y \\
&\qquad\qquad \xrightarrow{\beta.y = V_3} C^2 x \leq V_2.P^2_{(3)} + (y-V_2)\, P^2_{(2)} \\
&Z_{\max} = f_{(3)}y + C_{(3)}y \quad Z_{\min} = f_{(1)}y + C_{(1)}y \quad y \in \{0,1\} \quad x, v \geq 0 \leq \alpha, \beta \leq 1 \\
&v_1 \leq My \quad v_1 \geq M(y-1) + \alpha \quad v_1 \leq \alpha \quad v_2 \leq My \quad v_2 \geq M(y-1) + \beta, \quad v_2 \leq \beta \\
&v_3 \leq My \quad v_3 \geq M(y-1) + \beta \quad v_3 \leq \beta \quad \tilde{d}^1 = (d^1_{(1)}, d^1_{(2)}, d^1_{(3)}) \quad \tilde{d}^2 = (d^2_{(1)}, d^2_{(2)}, d^2_{(3)}) \\
&\tilde{S}^1 = (S^1_{(1)}, S^1_{(2)}, S^1_{(3)}) \quad \tilde{S}^2 = (S^2_{(1)}, S^2_{(2)}, S^2_{(3)}) \quad \tilde{P}^1 = (P^1_{(1)}, P^1_{(2)}, P^1_{(3)}) \quad \tilde{P}^2 = (P^2_{(1)}, P^2_{(2)}, P^2_{(3)})
\end{aligned}
\qquad (51)
$$

لازم به ذکر است که $\tilde{d}^1$, $\tilde{d}^2$, $\tilde{S}^1$, $\tilde{S}^2$, $\tilde{P}^1$, $\tilde{P}^2$ به صورت اعداد فازی مثلثی می‌باشند.

۶ حل مسأله و نتایج

در این پژوهش مدل ریاضی در نرم افزار گمز کد نویسی شده است که با توجه به حجم بالای داده‌ها و محاسبات امکان اجرا نرم‌افزار در کامپیوترهای شخصی وجود نداشت و نیاز به زمان نسبتا زیادی برای اجرای مسأله بود، بنابراین کد گمز به سرور بهینه‌سازی نئوس[۳۰] ارسال شد و نتایج از طرف سرور در قالب ایمیل دریافت شد. در این پژوهش تلاش شده است که پارامترهای استفاده شده در مدل به واقعیت نزدیک باشند، تمامی فواصل به طور دقیق از گوگل مپ[۳۱] محاسبه شده‌اند، هزینه‌های حمل و نقل با یک

[30] https://neos-server.org/neos/

[31] Google Map

تقریب کلی از شرکت‌های حمل و نقل در نظر گرفته شده‌اند. هزینه‌های نگهداری بر اساس میانگین هزینه نگهداری در انبارهای صنعتی مشابه، هزینه‌های احداث تسهیلات در مناطق مختلف به طور تقریبی بر اساس متراژ و با پرس و جو از سازنده‌های تسهیلات صنعتی، هزینه‌های کمبود هر واحد محصول به طور تقریبی و به صورت درصدی از هزینه‌های نگه‌داری هر واحد محصول، تقاضاها به صورت تقریبی و بر اساس آمار و اطلاعات ارائه شده توسط وزارت صنعت، معدن و تجارت[۳۲]، ظرفیت نگهداری بر اساس اطلاعات تسهیلات مشابه و با نظر خبره و ظرفیت عرضه به صورت درصدی از ظرفیت نگهداری در نظر گرفته شده‌اند. در مدلسازی عدم‌قطعیت، برای تشکیل عدد فازی مثلثی برای پارامترها، بعد اول دیتاهای اصلی مسأله هستند اما بعد دوم و سوم با اندکی افزایش دلخواه در نظر گرفته شده‌اند. در قسمت اعتبارسنجی مسأله با استفاده از شبیه‌سازی، ۵ پارامتر شبیه‌سازی شده به صورت اعداد تصادفی یکنواخت بین بعد اول و سوم عدد فازی مثلثی متناظر تولید شده‌اند.

۱.۶ مطالعه موردی

در این پژوهش به دنبال پیاده‌سازی مسأله طراحی شبکه توزیع و بهینه‌سازی سیستم توزیع در کارخانه ایساکو هستیم. کارخانه ایساکو کار تهیه و توزیع قطعات یدکی خودروهای تولید شرکت ایران خودرو را بر عهده دارد که در کیلومتر ۱۳ جاده مخصوص قرار دارد . قطعات یدکی از این کارخانه به انبارهای مختلف شرکت درسراسر کشور از جمله تهران حمل می‌گردد و سپس از این انبارها کار توزیع به نمایندگی‌ها و خرده فروشان انجام می‌گیرد و در نهایت قطعات توسط خرده فروشان و نمایندگی‌ها در مناطق مشتری توزیع می‌شوند. طبق نظر مدیران شرکت و کارشناسان شرکت ایساکو اگر در چند نقطه از شهر تهران انبارهای سطح شهر و همچنین انبارهای مرکزی وجود داشته باشد و مشتریان به نحو مناسبی به این انبارها تخصیص یابند، هم هزینه‌های حمل و نقل و تامین تقاضا کاهش می‌یابد و هم با توجه

[32] www.mimt.gov.ir

به رقابت شدید در تامین قطعات در صنعت خودرو، اهمیت سرعت پاسخگویی به نیاز مشتریان، شرکت می‌تواند سهم بازار بیشتری را به خود اختصاص دهد. هر منطقه علاوه بر این که می‌تواند نقش توزیع‌کننده را داشته باشد، مشتری نیز محسوب می‌شود. به بیان بهتر تمام مناطق جزو مشتریان هستند کارخانه می‌خواهد بهترین مکانها را از مجموعه ای نقاط بالقوه برای ایجاد مراکز توزیع مشخص کند، به طوری که هزینه کل توزیع کالا به مشتریان و نگهداری در انبارها و هزینه‌های کمبود حداقل گردد. در این تحقیق ما محدوده‌ی مطالعه را به سطح شهر تهران و مناطق ۲۲ گانه محدود می‌کنیم. با توجه به بالا بودن هزینه‌های توزیع، حمل و نقل و نگهداری قطعات، ایساکو همواره به دنبال مکانیابی درست و بهینه انبارهای خود در سطح مناطق ۲۲ گانه تهران بوده است، از سوی دیگر با توجه به افزایش روز افزون تولید خودرو در ایران خودرو و همچنین افزایش تقاضا برای قطعات یدکی از سوی مصرف کنندگان ایساکو همواره به دنبال افزایش ظرفیت خود از طریق افزایش تعداد انبار های مرکزی بوده است.

۱.۱.۶ نحوه تعیین مقادیر اندیس‌ها

مجموعه نقاط بالقوه انبار سطح شهر :
با توجه به اینکه انبارها در تمام مناطق ۲۲ گانه می‌توانند احداث شوند، لذا تمام مناطق ۲۲ گانه را به عنوان نقاط بالقوه برای احداث انبارهای جدید سطح شهر در نظر می‌گیریم، بنابراین داریم:

$$j = \{۱, ۲, ۳, \ldots, ۲۲\}$$

با توجه به اینکه تحلیل در ۲۲ منطقه بسیار سخت است، بنابراین با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره ۵ منطقه با بالاترین اولویت را برای احداث انبار سطح

شهر به عنوان نقطه کاندید انتخاب می‌کنیم که به صورت زیر می‌باشند:

$$j = \{۲, ۴, ۵, ۱۵, ۱۶\}$$

مجموعه نقاط بالقوه انبار مرکزی : انبار مرکزی نیز با توجه به ملاحظات مکانیابی می‌تواند در اکثر مناطق صنعتی تهران احداث شود، اما برای ساده شدن محاسبات بر اساس روش تاپسیس تعداد ۳ نقطه را به عنوان نقاط بالقوه برای احداث انبار مرکزی در نظر می‌گیریم که عبارت‌اند از : جاده مخصوص کرج، شهرک صنعتی عباس آباد و شهرک صنعتی خاوران

$$M = \{۱, ۲, ۳\}$$

خانواده‌ی محصولات :
جهت کاهش حجم محاسبات محصولات را به صورت خانواده اقلام مصرفی، اقلام موتوری، اقلام بدنه، اقلام برقی بنابراین داریم:

$$K = \{۱, ۲, ۳, ۴\}$$

مجموعه‌ی توزیع‌کنندگان شامل نمایندگی‌های ایساکو، ایران خودرو و خرده فروش‌ها:
تمام مناطق ۲۲ گانه تهران به عنوان مناطق توزیع‌کننده محسوب می‌شوند. باتوجه به اینکه ۱۲۰ نمایندگی ایساکو، ایرانخودرو و فروشگاه ایساکو در سطح تهران موجود است، برای جلوگیری از افزایش ابعاد مسأله پس از حذف نمایندگی‌های فروش و ترکیب تقاضای فروشگاه‌های نزدیک به هم، نهایتا ۶ نقطه را به عنوان نقاط موجود برای مراکز توزیع در نظر می‌گیریم،۶ نمایندگی برتر اعلام شده توسط ایساکو را در نظر گرفته و مابقی عاملیت‌های توزیع را در آنها ترکیب می کنیم بنابراین داریم:

$$I = \{۵, ۶, ۱۳, ۱۴, ۱۷, ۲۰\}$$

دوره افق برنامه‌ریزی:
با توجه به محیط پر تلاطم کسب و کار در کشور ناشی از تحریم‌های بین‌المللی، نوسان

متعدد نرخ ارز، عدم همکاری شرکای خارجی و ... پس از بررسی‌های متعدد مشخص شد که به سبب تغییرات روز افزون و سریع پارامترهای مربوط به طراحی شبکه زنجیره‌تأمین قطعات خودرو، نظیر هزینه‌ها، ظرفیت‌ها، نرخ تحویل قطعات و ... عملا امکان برنامه‌ریزی برای مدت زمان بیشتر از یکسال وجود ندارد. علت این امر در این است که پس از مشاهده داده‌های تاریخی مرتبط با صنعت خودروسازی و همچنین بازار ارز مشخص شد که تقریبا هر سال شوک‌های ناگهانی و جهش‌های غیر متعارف در این دو حوزه مشاهده می‌شود، بنابراین برنامه‌ریزی برای افق زمانی بیشتر از یک سال به سبب سرعت بالای تغییرات و اختلال در صنعت خودروسازی عملا امکان پذیر نمی‌باشد. از سوی دیگر پس از بررسی اطلاعات مرتبط با تقاضای خودرو و قطعات یدکی در کشور، مشخص شد که شرکت‌های خودروسازی و قطعه‌سازی تقریبا هر دو ماه یکبار با اتخاذ سیاست‌های فروش و تولید جدید منجر به تغییر الگو تقاضا این محصولات می‌گردند و در طی دو ماه مقادیر تقاضا تا حدودی پایدار است، از این رو در این پژوهش طول هر دوره زمانی دو ماه در نظر گرفته می‌شود.

افق برنامه‌ریزی در این پژوهش به صورت ۱ ساله در نظر گرفته شده است که علت این امر حفظ دقت در پیشبینی مقادیر پارامترها می‌باشد. طول هر دوره معادل ۲ ماه در نظر گرفته می‌شود و در کل مدل به صورت ۶ دوره‌ای اجرا می‌شود.

$$T = \{۱, ۲, ۳, ۴, ۵, ۶\}$$

مجموعه نقاط منطقه مشتری:

با توجه به اینکه تمامی متقاضیان در مناطق ۲۲ گانه تهران مشتریان زنجیره توزیع محسوب میشوند و همچنین به منظور ساده‌سازی تحلیل، مناطق نزدیک به هم را به صورت خوشه مشتری‌ها در نظر گرفتیم و مناطق مشتری در قالب ۶ خوشه دسته بندی‌شدند که جزئیات خوشه‌ها در نتایج حل مشخص شده است.

$$L = \{۱, ۲, ۳, ۴, ۵, ۶\}$$

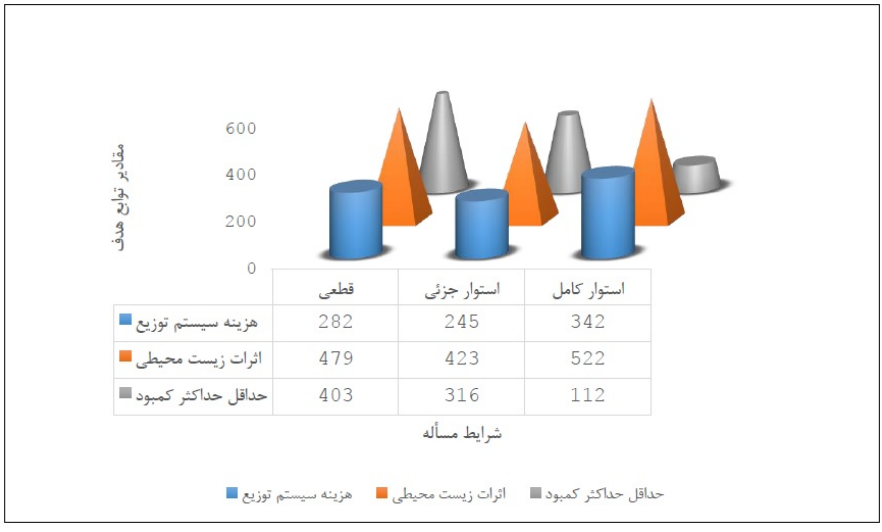
۲.۶ نتایج مدل‌ها

۱.۲.۶ نتایج عددی

مدلسازی در مسأله مذکور با سه رویکرد قطعی، استوارسازی جزئی و استوارسازی کامل صورت گرفته است که پس از حل هر سه مدل، نتایج توابع هدف هزینه سیستم توزیع، مجموع زمان سفر و حداقل نمودن حداکثر کمبود رخداده در مناطق مشتری در قالب شکل ۲ مقایسه شده‌اند و همانطور که مشخص است با توجه به ماهیت حداقل‌سازی توابع هدف، رویکرد استوارسازی جزئی بهترین عملکرد را در مسأله داشته است و بر این اساس به عنوان مبنای مدلسازی قرار می‌گیرد و سایر تحلیلها از این پس بر روی نتایج حاصل از استوارسازی جزئی اجرا می‌گردد. همچنین در مدل رباست کامل با توجه به سخت‌گیری زیادی که صورت گرفته است، در تمامی سطوح همه تسهیلات فعال شدند و تابع هدف هزینه افزایش زیادی را متحمل شد اما در عوض تابع هدف سوم مقدار قابل توجهی کاهش یافت. لازم به ذکر است واحد اندازه‌گیری تابع هدف هزینه به صورت (ریال $\times ۱۰^{۱۴}$)، تابع هدف اثرات زیست‌محیطی (تن $\times ۱۰^{۱۲}$) و تابع هدف عدالت اجتماعی (تن $\times ۱۰^{۳}$) می‌باشد.

۲.۲.۶ نتایج مدیریتی

بر اساس مدل استوار جزئی اجرا شده ۱ انبار مرکزی در شهرک صنعتی عباس‌آباد و همچنین تعداد ۳ انبار سطح شهر در مناطق ۴، ۵ و ۱۶ فعال می‌شوند. انبار سطح شهر منطقه ۴ محصولات را به مرکز توزیع منطقه ۱۳، انبار سطح شهر منطقه ۵ محصولات را به مراکز توزیع مناطق ۶، ۱۴و ۲۰، انبار سطح شهر منطقه ۱۶ محصولات را به مناطق ۵ و ۱۷ ارسال می‌کند. همانطور که قبلا بیان شد، ۹۰ توزیع‌کننده اصلی در سطح استان تهران در قالب ۶ مرکز توزیع در مناطق ۵، ۶، ۱۳، ۱۴، ۱۷ و ۲۰ ترکیب شده اند. مرکز توزیع منطقه ۵ تقاضای مناطق ۲، ۵، ۲۱ و ۲۲، مرکز توزیع منطقه ۶ تقاضای مشتریان مناطق ۱، ۳، ۴ و ۶، مرکز توزیع منطقه ۱۳ تقاضای مشتریان مناطق ۷، ۸ و ۱۳، مرکز توزیع منطقه ۱۴ تقاضای مشتریان مناطق ۱۱، ۱۲، ۱۴ و ۱۵، مرکز توزیع منطقه ۱۷ تقاضای

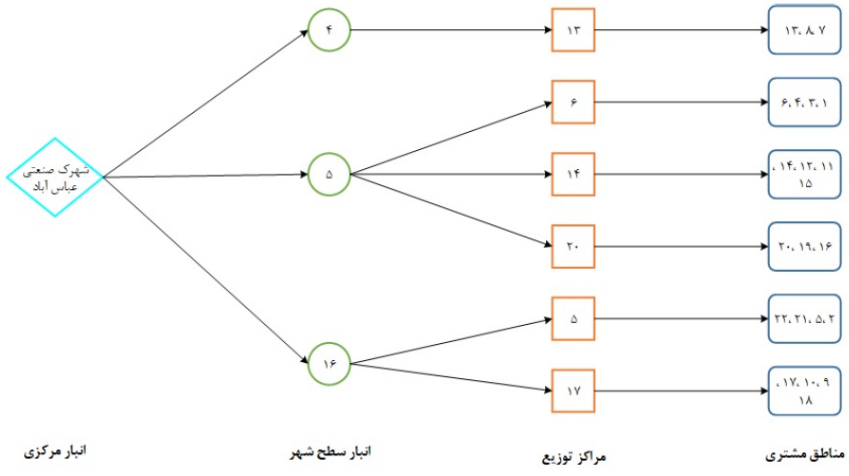


شکل ۲: *مقایسه‌ی نتایج مدل‌های قطعی، رباست کامل و جزئی*

مشتریان مناطق ۹، ۱۰، ۱۷ و ۱۸ و در نهایت مرکز توزیع منطقه ۲۰ تقاضای مشتریان مناطق ۱۶، ۱۹ و ۲۰ را پوشش می‌دهد. با توجه به اطلاعات ارائه شده توسط مدل نیاز به جابه‌جایی انبار مرکزی ایساکو از جاده مخصوص به شهرک صنعتی خاوران کاملا محسوس است. نتایج تحصیص‌های بهینه حاصل از حل مدل به صورت گرافیکی در شکل ۳ قابل مشاهده هستند.

از جمله سایر نتایج مدیریتی می‌توان به نقش انبارهای مرکزی و سطح شهر در شبکه توزیع مورد بررسی اشاره نمود. همانطور که پیشتر مطرح گردید انبارها به سبب نگهداری موجودی به عنوان پشتیبان یک شبکه توزیع تلقی می‌گردند که می‌توانند در مواقع نوسانات تقاضا، وقوع بحران و ریسک و ... خوراک مورد نیاز زنجیره را تأمین نمایند. در واقع انبارهای مرکزی و سطح شهر نقش اساسی در کاهش هزینه‌های فروش از دست رفته، کاهش زمان تحویل محصول به مشتری و بهبود سطح خدمت‌رسانی دارند.

مزیت در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در فضای کسب و کار یک نتیجه مدیریتی دیگر است که نیازمند توجهی ویژه است. بر اساس نتایج به دست آمده در نظر نگرفتن عدم‌قطعیت در فضای کسب و کار می‌تواند منجر به افزایش سطح فروش از رفته و کاهش رضایت‌مندی مشتریان و در نتیجه به خطر افتادن اعتبار سازمان گردد. هرچند در نظر گرفتن ریسک عملیاتی در کوتاه مدت منجر به رشد هزینه‌ها می‌گردد، اما در بلند مدت توانایی سیستم



شکل ۳: *نتایج تخصیص‌های بهینه حاصل از حل مدل استوار جزئی*

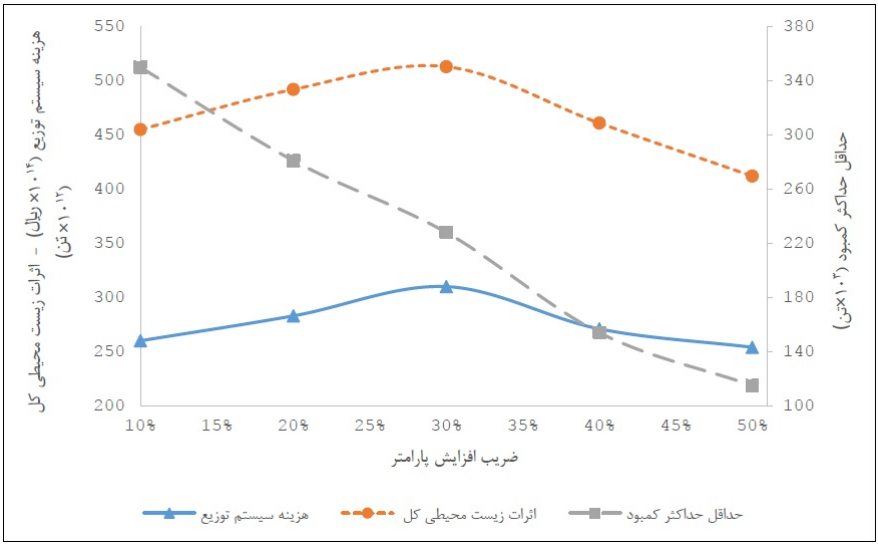
برای مقابله با نوسانات و اغتشاش‌ها افزایش می‌یابد که این امر منجر به بهبود سطح رضایت‌مندی مشتریان و سودآوری سازمان می‌گردد.

۳.۶ اعتبارسنجی نتایج

۱.۳.۶ تجزیه و تحلیل حساسیت بر اساس نتایج مدل استوارسازی جزئی

پس از حل مدل برای بررسی منطقی بودن واکنش و رفتار مدل در برابر تغییرات باید به تجزیه و تحلیل حساسیت آن بپردازیم. برای این منظور باید نتایج حاصل از تغییرات پارامترهای خاص در مدل را مورد ارزیابی قرار دهیم. پارامترهایی می‌توانند برای تجزیه و تحلیل حساسیت مورد بررسی قرار بگیرند که به صورت برونزا باشند و از داخل سیستم یا زنجیره‌تأمین کنترلی بر آنها نداشته باشیم. مراکز توزیع در شرکت ایساکو معمولا به اشخاص حقیقی واگذار می‌شوند و به این علت شرکت نمی‌تواند پایش مناسبی بر وضعیت این مراکز در هر لحظه از زمان داشته باشند و به این علت پارامترهایی از جمله ظرفیت نگهداری و ظرفیت عرضه قطعات در مراکز توزیع در این مسأله برونزا می‌باشند و می‌توان با تغییر آنها تغییر رفتار مدل را ارزیابی نمود.

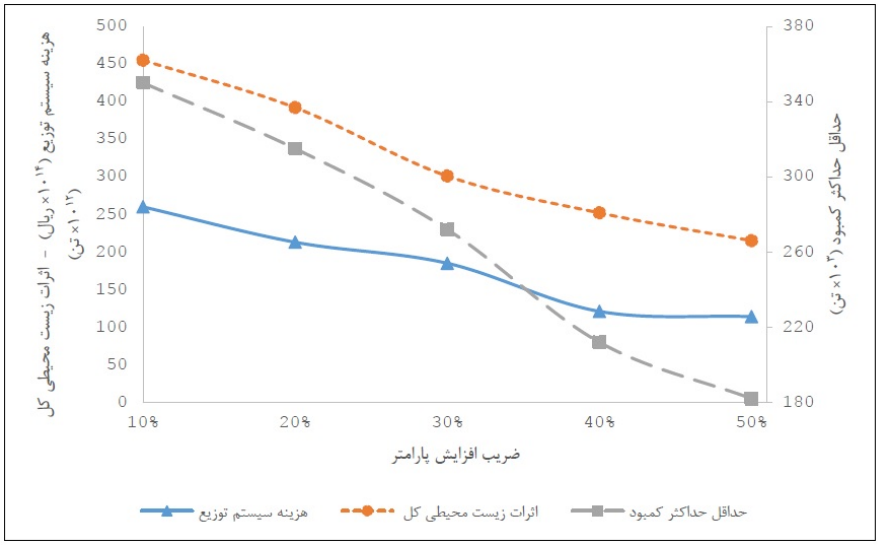
همانطور که مشاهده می‌شود بر اساس شکل ۴ با افزایش ظرفیت عرضه توزیع‌کنندگان به طور کلی به تدریج حداقل حداکثر کمبود، هزینه سیستم توزیع و مجموع اثرات



شکل ۴: *تجزیه تحلیل حساسیت با استفاده از ظرفیت عرضه توزیع‌کنندگان*

زیست‌محیطی کاهش می‌یابند که این رفتار کاملا منطقی است، زیرا هر چه عرضه توسط توزیع‌کننده بیشتر شود کمتر با کمبود مواجه خواهیم بود و هزینه کمتری برای کمبود رخداده پرداخت خواهد شد و از طرفی توزیع‌کنندگان موجودی بیشتری از محصولات را عرضه خواهند نمود و در نتیجه نیاز کمتری به حمل و نقل خواهد بود و در پی آن اثرات زیست‌محیطی کاهش می‌یابند همانطور که مشاهده می‌شود بر اساس شکل ۵ با افزایش ظرفیت نگهداری توزیع‌کنندگان به تدریج حداقل حداکثر کمبود، هزینه سیستم توزیع کاهش می‌یابد که این رفتار کاملا منطقی است و مجموع زمان سفر رفتار مشخصی ندارد. کاهش تابع هدف ۱ و ۳ به این علت رخ می دهد که هر چه ظرفیت نگهداری توزیع‌کننده بیشتر شود کمبود کمتری رخ خواهد داد و هزینه کمتری برای کمبود رخداده پرداخت خواهیم کرد و از طرفی توزیع کنندگان موجودی بیشتری از محصولات را عرضه خواهند نمود و در نتیجه نیاز کمتری به حمل و نقل خواهد بود و در پی آن مسافت کمتری طی خواهد شد و زمان سفر کاهش می‌یابد.

با توجه به اینکه منطق مدل از لحاظ تحلیل حساسیت صحیح است، بنابراین می‌توان عملکرد مدل را تا حدودی معتبر و مناسب دانست.

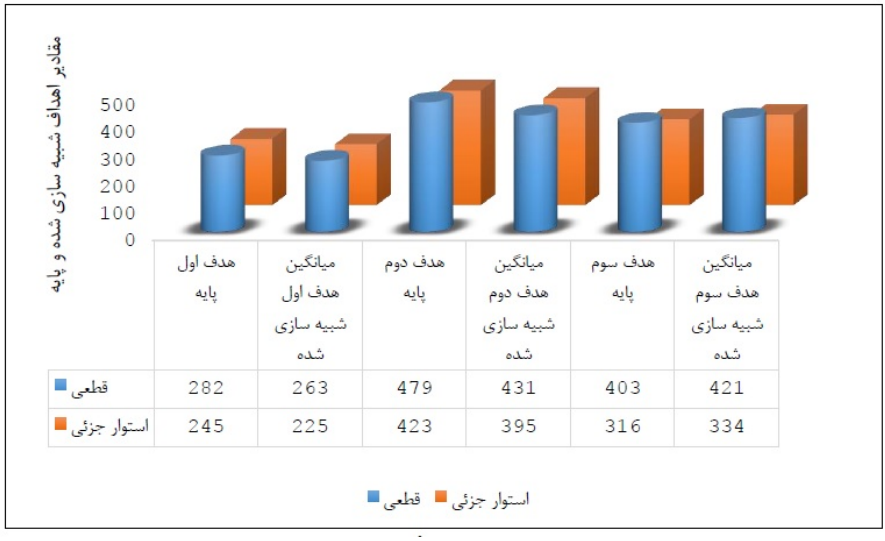


شکل ۵: *تجزیه و تحلیل حساسیت با استفاده از ظرفیت نگهداری توزیع کنندگان*

۲.۳.۶ شبیه‌سازی استواری

برای اعتبارسنجی مدل‌های قطعی و استوار جزئی از روش شبیه‌سازی استواری استفاده شده است. به این صورت که تمامی پارامترهای مدل را به صورت عدد فازی مثلثی در نظر شده و در هر دو مدل پارامترها با امید ریاضی فازیشان جایگزین شده است. سپس جواب هر مدل در این حالت به دست آمده و به عنوان جواب پایه در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی در ۲۰۰ اجرا صورت گرفته است و در هر اجرا برای پارامترهای دارای عدم‌قطعیت اعداد تصادفی یکنواخت بین حد بالا و پایین اعداد فازی تولید شده است. در هر تکرار با توجه ماهیت حداقل‌سازی توابع هدف، جریمه نشدنی شدن محدودیتها به هر کدام از مقادیر پایه توابع هدف با در نظر گرفتن نرخ جریمه واحد منطقی اضافه شده است. لازم به ذکر است واحد اندازه‌گیری تابع هدف هزینه به صورت (ریال $\times ۱۰^{۱۴}$)، تابع هدف اثرات زیست‌محیطی (تن $\times ۱۰^{۱۲}$) و تابع هدف عدالت اجتماعی ($\times ۱۰^{۳}$ تن) می‌باشد. مقادیر پایه توابع هدف، مقادیر میانگین و انحراف معیار هر تابع هدف شبیه‌سازی شده در دو مدل قطعی و استوار جزئی به شرح ذیل می‌باشد:

همانطور که ملاحظه می‌شود بر اساس شکل ۶ میانگین هر سه تابع هدف شبیه‌سازی شده در حالت‌های قطعی و استوار جزئی و استوار کامل نزدیک به مقادیر اصلی هدف در هر

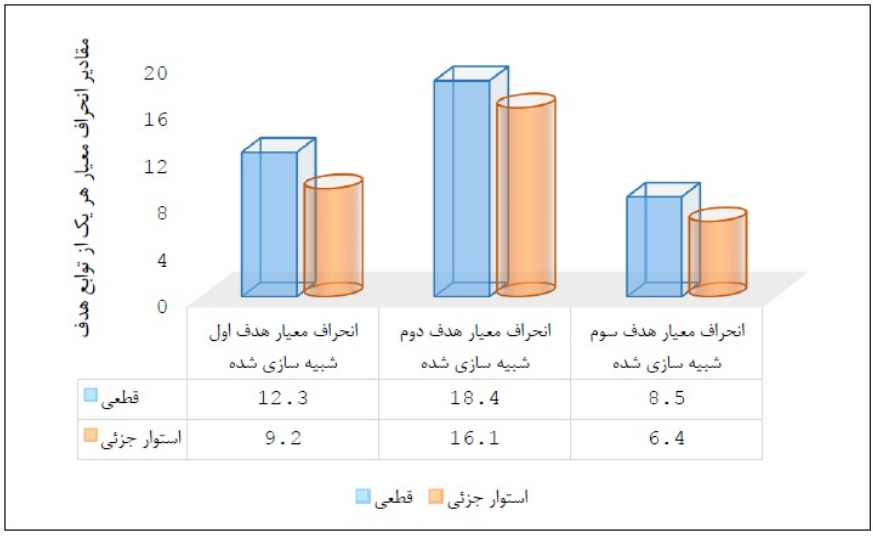


شکل ۶: *مقایسه میانگین توابع هدف شبیه‌سازی شده و مسأله اولیه در حالت قطعی، استوار جزئی و استوار کامل*

سه مدل می‌باشد، بنابراین از لحاظ میانگین نتایج شبیه‌سازی مدل عملکرد خوبی دارد اما بر اساس نتایج حاصل از میانگین شبیه‌سازی نمی‌توان در ارتباط با معتبر بودن مدل استوار به کار رفته اظهار نظر نمود. در واقع از میانگین‌های نتایج شبیه‌سازی هر یک از اهداف جهت تعیین مقادیر انحراف معیار هر یک از آنها در هر دو مدل قطعی و استوار جزئی استفاده می‌کنیم و در صورتی که انحراف معیار نتایج شبیه‌سازی برای تمام اهداف در مدل استوار از مدل قطعی کمتر باشد، در این صورت می‌توان مدل استوار ارائه شده را معتبر شمرد.

در گام بعدی باید انحراف معیار نتایج شبیه‌سازی برای هر سه هدف و در هر دو حالت مدل قطعی و استوار جزئی مورد ارزیابی قرار بگیرد و در صورت قابل قبول بودن مقادیر انحراف معیار می‌توان اظهار نظر انجام شده بر اساس میانگین نتایج شبیه‌سازی را برای مدل ریاضی پذیرفت. لازم به ذکر است واحد اندازه‌گیری انحراف معیار نتایج شبیه‌سازی تابع هدف هزینه به صورت (ریال $\times 10^{14}$)، تابع هدف اثرات زیست‌محیطی (تن $\times 10^{12}$) و تابع هدف عدالت اجتماعی ($\times 10^{3}$ تن) می‌باشد.

بر اساس شکل ۷ با توجه به اینکه مقادیر انحراف معیار هر یک از توابع هدف شبیه‌سازی شده در مدل استوار کمتر از مدل قطعی است، مدل ریاضی ارائه شده را می‌توان معتبر



شکل ۷: *مقایسه انحراف معیار هر یک از توابع هدف شبیه‌سازی شده در حالت قطعی و استوار جزئی*

شمرد. از این رو اظهار نظر صورت گرفته بر اساس مقدار میانگین نتایج شبیه‌سازی معتبر می‌باشد و با توجه به اینکه میانگین توابع هدف بسیار به مقادیر پایه نزدیک است، بنابراین مدل اعتبار بالایی دارد و کاملا قابل استناد است.

۳.۳.۶ کمیته خبرگان

پس از حل مدل و استخراج نتایج، تحلیل‌های نهایی در اختیار خبرگان صنعت قرار گرفته است که ایشان پس از مقایسه عملکرد مدل طراحی شده بر اساس نتایج ارائه شده و همچنین زنجیره موجود بر اساس داده‌های تاریخی، مدل ارائه شده و نتایج مطرح شده را معتبر شمردند.

۷ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش یک مسأله طراحی شبکه توزیع با هدف دستیابی به حداقل هزینه، حداقل اثرات زیست‌محیطی و همچنین اجرای عدالت در توزیع محصولات میان مشتریان و برآورده کردن تقاضای آنها در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، مسأله طراحی شبکه

توزیع پنج سطحی رو به جلو به صورت چند محصولی، چند سطحی و چند دوره‌ای در نظر گرفته شده است که سیستم مربوطه در معرض ریسک عدم‌قطعیت قرار دارد. مدل ارائه شده در این پژوهش کاملا متناسب با شرایط فعلی و عملکرد زنجیره‌ی توزیع در شرکت ایساکو می‌باشد که برای مناطق ۲۲ گانه تهران پیاده‌سازی شده است. با توجه به اینکه عدم برآورده کردن تقاضای مشتریان در مراکز توزیع، منجر به مراجعه مشتری به مراکز دیگر می‌شود، بنابراین کمبود به صورت فروش از دست رفته در مسأله لحاظ شد. نوآوری‌های مدل در قالب برقرای عدالت در برآورده کردن تقاضای مشتریان مناطق مختلف، در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترها با استفاده از روش بهینه‌سازی استوار، تلاش برای تحویل محصولات به مشتریان در حداقل زمان ممکن از طریق در نظر گرفتن حداقل زمان کل سفر و از استفاده ترکیب نظریه فازی و روش تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب نقاط کاندید از میان نقاط بالقوه انتخاب شده توسط خبره صورت پذیرفته است. مسأله پیشنهادی را می‌توان با در نظر گرفتن شرایط زیر توسعه داد:

- ترکیب مسأله مکان یابی و مسیریابی به طور همزمان
- درنظر گرفتن امکان تبادل محصولات بین تسهیلات یک سطح برای جلوگیری از وقوع کمبود
- در نظر گرفتن کمبود به صورت تقاضای پس افت و در نظر گرفتن رضایت مشتری
- وارد کردن مفاهیم زنجیره‌تأمین پایدار[۳۳] به زنجیره‌تأمین فعلی
- در نظر گرفتن ریسک اختلال در تسهیلات و مسیرهای حمل و نقل
- پیاده‌سازی تاب‌آوری در شبکه توزیع با هدف مقابله با اختلالات

مراجع

[1] Ouhimmou, M., et al., Design of robust distribution network under demand uncertainty: A case study in the pulp and paper. International Journal of Production Economics. 218 (2019)96-105.

[33] Sustainable supply chain

[2] Mishra, S. and S.P. Singh, Distribution network model using big data in an international environment. Science of the Total Environment. 707 (2020)135549.

[3] Melchor-Pereda, P., et al., Methodology for Storage Location Allocation Based on the Planning of Material Requirements, in Handbook of Research on Developments and Trends in Industrial and Materials Engineering. 2020, IGI Global. p. 50-77.

[4] Rahimi, M., V. Ghezavati, and F. Asadi, A stochastic risk-averse sustainable supply chain network design problem with quantity discount considering multiple sources of uncertainty. Computers Industrial Engineering. 130 (2019)430-449.

[5] Pettit, T.J., K.L. Croxton, and J. Fiksel, The evolution of resilience in supply chain management: a retrospective on ensuring supply chain resilience. Journal of Business Logistics. 40(1) (2019)56-65.

[6] Pishvaee, M.S., M. Rabbani, and S.A. Torabi, A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. Applied Mathematical Modelling. 35(2) (2011)637-649.

[7] Govindan, K., M. Fattahi, and E. Keyvanshokooh, Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. European Journal of Operational Research. 263(1) (2017)108-141.

[8] Silva, F.J.F. and D. De la Figuera, A capacitated facility location problem with constrained backlogging probabilities. International journal of production research. 45(21) (2007)5117-5134.

[9] Klose, A. and A. Drexl, Facility location models for distribution system design. European journal of operational research. 162(1) (2005)4-29.

[10] Barreto, S., et al., Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem. European Journal of Operational Research. 179(3) (2007)968-977.

[11] Prins, C., et al., Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative Lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. Transportation Science. 41(4) (2007)470-483.

[12] Chen, C.-H. and C.-J. Ting, Combining lagrangian heuristic and ant colony system to solve the single source capacitated facility location problem. Transportation research part E: logistics and transportation review. 44(6) (2008)1099-1122.

[13] Lin, C., Stochastic single-source capacitated facility location model with service level requirements. International Journal of Production Economics. 117(2) (2009)439-451.

[14] Jafari, A., M. Sharif-Yazdi, and M. Jafarian, A New Multi-objective Approach in Distribution Centers Location Problem in Fuzzy Environment. Journal of uncertain systems. 4(2) (2010)133-146.

[15] Vincent, F.Y., et al., A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem. Computers Industrial Engineering. 58(2) (2010)288-299.

[16] Zarandi, M.H.F., A. Hemmati, and S. Davari, The multi-depot capacitated location-routing problem with fuzzy travel times. Expert Systems with Applications. 38(8) (2011)10075-10084.

[17] Küçükdeniz, T., et al., Integrated use of fuzzy c-means and convex programming for capacitated multi-facility location problem. Expert Systems with Applications. 39(4) (2012)4306-4314.

[18] Contardo, C., J.-F. Cordeau, and B. Gendron, An exact algorithm based on cut-and-column generation for the capacitated location-routing problem. INFORMS Journal on Computing. 26(1) (2014)88-102.

[19] Nadizadeh, A. and H.H. Nasab, Solving the dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm. European Journal of Operational Research. 238(2) (2014)458-470.

[20] Rahmani, A. and S. MirHassani, A hybrid firefly-genetic algorithm for the capacitated facility location problem. Information Sciences. 283 (2014)70-78.

[21] Diabat, A., A capacitated facility location and inventory management problem with single sourcing. Optimization Letters. 10(7) (2016)1577-1592.

[22] Nadizadeh, A. and B. Kafash, Fuzzy capacitated location-routing problem with simultaneous pickup and delivery demands. Transportation Letters. 11(1) (2019)1-19.

[23] Zahiri, B., J. Zhuang, and M. Mohammadi, Toward an integrated sustainable-resilient supply chain: A pharmaceutical case study. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 103 (2017)109-142.

[24] Hong, Y.S., W.T. Huh, and C. Kang, Sourcing assemble-to-order inventories under supplier risk uncertainty. Omega. 66 (2017)1-14.

[25] Jabbarzadeh, A., B. Fahimnia, and F. Sabouhi, Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks. International Journal of Production Research. 56(17) (2018)5945-5968.

[26] Zadeh, L.A., Fuzzy sets. Information and control. 8(3) (1965)338-353.

[27] Chen, S.H. and C.H. Hsieh, Representation, ranking, distance, and similarity of LR type fuzzy number and application. Australian Journal of Intelligent Processing Systems. 6(4) (2000)217-229.

[28] Lootsma, F.A., Saaty's priority theory and the nomination of a senior professor in operations research. European Journal of Operational Research. 4(6) (1980)380-388.

[29] Rezaei, J., Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. Omega. 64 (2016)126-130.

[30] Ranjbar, H.R. and M.A. Nekooie, An improved hierarchical fuzzy TOPSIS approach to identify endangered earthquake-induced buildings. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 76 (2018)21-39.

[31] Kahraman, C., et al., Fuzzy multi-criteria evaluation of industrial robotic systems using TOPSIS, in Fuzzy multi-criteria decision making. 2008, Springer. p. 159-186.

[32] Olivares-Benitez, E., R.Z. Ríos-Mercado, and J.L. González-Velarde, A metaheuristic algorithm to solve the selection of transportation channels in supply chain design. International Journal of Production Economics. 145(1) (2013)161-172.

[33] Khalili-Damghani, K., M. Nojavan, and M. Tavana, Solving fuzzy Multidimensional Multiple-Choice Knapsack Problems: The multi-start Partial Bound Enumeration method versus the efficient epsilon-constraint method. Applied Soft Computing. 13(4) (2013)1627-1638.

[34] Mavrotas, G., Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems. Applied mathematics and computation. 213(2) (2009)455-465.

[35] Sadjadi, S.J., M. Heidari, and A.A. Esboei, Augmented ε-constraint method in multiobjective staff scheduling problem: a case study. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 70(5-8) (2014)1505-1514.

[36] Sheu, R.-L. and J. Lin, Solving continuous min-max problems by an iterative entropic regularization method. Journal of Optimization Theory and Applications. 121(3) (2004)597-612.

[37] Pishvaee, M.S., J. Razmi, and S.A. Torabi, Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. Fuzzy sets and systems. 206 (2012)1-20.