

طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز چندهدفه چند محصولی و چند دوره‌ای با در نظر گرفتن تخفیف در شرایط عدم قطعیت

جاوید قهرمانی نهر^۱، علی قدرت‌نما^{۲*}، حمیدرضا ایزدبخش^۲، رضا توکلی مقدم^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران.

۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران.

۳. استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

خلاصه

در جهان امروز، تغییرات در عرصه اقتصاد و صنعت با سرعت بیشتری نسبت به گذشته در حال وقوع می‌باشد. هدف سازمان‌ها و شرکت‌ها، حفظ و افزایش سود و همچنین بقا و دوام بیشتر در بازار است؛ به‌طوری‌که جهانی‌شدن فعالیت‌های اقتصادی در کنار رشد سریع فناوری و منابع محدود، شرکت‌ها را در یک رقابت تنگاتنگ قرار داده است. ازجمله مزیت‌های رقابتی برای شرکت‌ها، کاراتر و اثربخش‌تر کردن فعالیت‌هایی نظیر زنجیره تأمین است. همچنین به دلیل قوانین دولتی، مسائل زیست‌محیطی و گسترش مفهوم مسئولیت‌پذیری اجتماعی، مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته موردتوجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. زنجیره تأمین حلقه بسته شامل هر دو شبکه زنجیره تأمین روبه‌جلو و معکوس می‌باشد و هدف از طراحی آن ترکیب کردن ملاحظات محیطی با طراحی شبکه زنجیره تأمین سنتی از طریق جمع‌آوری محصولات استفاده‌شده و فعالیت‌های مربوط به استفاده مجدد از آن‌ها می‌باشد. در این مقاله یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته دو هدفه، چند دوره‌ای، چند محصولی با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی و اعمال مفاهیم کمبود قابل جبران و تخفیف، گسترش داده‌شده است. ابتدا مدل قطعی زنجیره تأمین حلقه بسته با استفاده از سه روش تصمیم‌گیری چندهدفه حل و نتایج محاسباتی نشان داده‌شده است. سپس با توجه به غیرقطعی بودن برخی پارامترها، مدل بهینه‌سازی استوار متناظر با مدل پیشنهادی ارائه و با روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه حل شده است. درنهایت بهترین روش موجود برای مدل‌های قطعی و غیرقطعی با استفاده از روش حل ایده آل جابجا شونده (فیلترینگ) برگزیده‌شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۴/۹/۱۴

پذیرش ۱۳۹۵/۹/۳

زنجیره تأمین حلقه بسته

سبز

روش‌های تصمیم‌گیری

چندهدفه

بهینه‌سازی استوار

عدم قطعیت

۱- مقدمه

زنجیره تأمین، یک مجموعه از سازمان‌هایی است که به‌وسیله جریان‌های مواد، اطلاعات و جریان‌های مالی به یکدیگر مرتبط می‌شوند. این سازمان‌ها می‌توانند شامل بنگاه‌هایی باشند که مواد

خام، قطعات و محصولات را تولید و خدماتی از قبیل توزیع، انبارش، عمده‌فروشی و خرده‌فروشی را ارائه دهند. در این مجموعه مشتریان نهایی، آخرین سطح یک زنجیره و یکی از اعضای این سازمان‌ها در نظر گرفته می‌شوند. شبکه‌های زنجیره تأمین به چند دسته کلی طبقه‌بندی می‌شوند: زنجیره تأمین سنتی که به‌عنوان زنجیره تأمین روبه‌جلو و یا حلقه باز شناخته می‌شود، یک سیستم یکپارچه تشکیل شده از اجزایی همانند مواد خام، تسهیلات تولیدی، خدمات

* نویسنده مسئول: علی قدرت نما

تلفن: ۰۲۶-۳۴۵۶۹۵۵۵؛ پست الکترونیکی: ghodratn@ut.ac.ir

توزیع و مشتریانی است که به وسیله جریان مواد در زنجیره روبه جلو و جریان اطلاعات در زنجیره معکوس با یکدیگر در ارتباط هستند [۱]. زنجیره تأمین معکوس به حرکت جریان مواد از سوی مشتری به تولیدکننده اشاره دارد. این زنجیره برخلاف زنجیره تأمین سنتی که در آن حرکت جریان مواد از سمت تولیدکننده به مشتری می‌باشد، طراحی می‌گردد. از طرفی در زنجیره تأمین معکوس، محصولات مصرف شده از سوی مصرف کننده نهایی به مراکز تولیدی در جریان است. از یکپارچگی زنجیره‌های تأمین روبه جلو و معکوس، زنجیره تأمین حلقه بسته نتیجه می‌شود [۲، ۳]. مسئله طراحی شبکه یکی از جامع‌ترین مسائل تصمیم‌گیری استراتژیک است که به بهینه‌سازی برای عملیات بلندمدت کارآمد کل زنجیره تأمین نیاز دارد. طراحی شبکه، تعداد، موقعیت، ظرفیت تسهیلات و همچنین کانال‌های توزیع و مقدار مواد لازم برای مصرف، تولید و حرکت آن از تولیدکننده به مشتریان را تعیین می‌کند. به دلیل چالش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی که در دهه اخیر سازمان‌ها را تهدید می‌نمود، رویکرد مشتری‌گرایی و تمرکز بر خواسته‌های آن و طراحی راهبرد سازمان بر این اساس (ایجاد رضایت مشتریان) قابلیت خود را برای ایجاد مزیت رقابتی از دست داده‌اند. این نگرش باعث آلودگی محیط‌زیست و تولید محصولات و فرایندهایی گردید که با محیط‌زیست هماهنگ نبوده است. در همین راستا سازمان‌ها بقای خود را در مسئولیت‌پذیری در سه حوزه اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی یافته‌اند. سبز کردن زنجیره تأمین، فرایند در نظر گرفتن معیارها یا ملاحظات زیست‌محیطی در سراسر زنجیره تأمین است، مدیریت زنجیره تأمین سبز، یکپارچه کننده مدیریت زنجیره تأمین با الزامات زیست‌محیطی در تمام مراحل طراحی محصول، انتخاب و تأمین مواد خام، تولید و ساخت، فرایندهای توزیع و انتقال، تحویل به مشتری و بالاخره پس از مصرف، مدیریت بازیافت و مصرف مجدد به منظور بیشینه کردن میزان بهره‌وری مصرف انرژی و منابع همراه با بهبود عملکرد کل زنجیره تأمین است.

در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت روزافزون مسائل طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته و معکوس، مقالات متعددی در این زمینه منتشر شده است. فلش من و همکاران [۴] با مطالعه مقالات منتشر شده در حوزه شبکه‌های لجستیک معکوس یک مطالعه مروری در این زمینه انجام دادند، آن‌ها مقالات موجود را بر اساس ۳ دسته کلی از جمله برنامه‌ریزی توزیع، موجودی و برنامه‌ریزی تولید دسته‌بندی و مورد بررسی قرار دادند. سلیمانی و همکارش [۵] یک مرور ادبیات بر روی طراحی مدل‌های شبکه‌های لجستیک معکوس و حلقه بسته انجام دادند. آن‌ها ۳۸۲ مقاله منتشر شده بین سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۳ را بر اساس سال و مجله منتشر شده، روش حل، توابع هدف و غیره دسته‌بندی و بیان کردند، حدود ۴۹/۷٪ از کل مسائل زنجیره تأمین انجام شده مربوط به طراحی شبکه‌های لجستیک حلقه بسته و ۳۹/۷٪ از آن‌ها مربوط به طراحی شبکه‌های لجستیک معکوس می‌باشد و تنها ۱۰/۶٪ از مقالات در زمینه شبکه‌های

زنجیره تأمین سبز و پایدار منتشر شده‌اند. یکی از عمده‌ترین تحقیقاتی که در زنجیره تأمین معکوس و حلقه بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، پیکربندی شبکه زنجیره تأمین می‌باشد. این زمینه شامل هماهنگی و یکپارچه‌سازی فعالیت‌های کلیدی تجاری از خرید مواد خام تا توزیع محصولات نهایی به مشتریان است که فرایند برنامه‌ریزی زنجیره تأمین را ایجاد می‌کند. در فرایندهای تصمیم‌گیری فاکتور اصلی که ممکن است اثربخشی پیکربندی و هماهنگی را در طول زنجیره تأمین تحت تأثیر قرار دهد، عدم قطعیت است. اسپالتمن و همکاران [۶] یک مدل لجستیک معکوس برای جمع‌آوری و بازیافت باتری در آلمان طراحی کردند. آن‌ها از یک رویه ترکیبی برای استقرار زنجیره تأمین حلقه بسته که حاصل یک مدل بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی شبکه لجستیک معکوس و مدل فرایند جریان برای بازیافت باتری بود استفاده کردند. ایندرفورس [۷] یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته که بر اساس برنامه‌ریزی احتمالی بیان شده بود را بررسی کرد. وی با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و نرخ برگشتی محصولات، پارامتری را برای اندازه‌گیری عدم قطعیت در کیفیت تعریف کرد. شو و همکاران [۸] در یک زنجیره تأمین سبز، یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه که به طور سیستماتیک عملیات یکپارچه لجستیک و لجستیک معکوس محصولات استفاده شده را بهینه می‌کرد، ارائه کردند. در این مسئله، فاکتورهایی نظیر نرخ بازگشت محصولات مصرف شده و تناظر مربوط به سازمان‌های دولتی برای لجستیک معکوس در فرمول‌بندی مسئله مورد توجه بودند. اهداف مسئله شامل حداکثر سازی سود بر اساس زنجیره‌های تولیدی و سود بر اساس زنجیره‌های برگشتی بود. مین و کو [۹] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته چند دوره‌ای دوسطحی چند محصولی و ظرفیت دار را با در نظر گرفتن جریان‌های روبه جلو و معکوس به طور هم‌زمان ارائه کردند. لیستس [۱۰] یک مدل احتمالی برای طراحی شبکه که شامل کانال‌های عرضه و برگشت در زنجیره تأمین حلقه بسته بود را ارائه و از روش شاخه و برش برای حل مدل پیشنهادی باهدف بیشینه‌سازی سود استفاده کردند. اوستر و همکاران [۱۱] یک مسئله مکان‌یابی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند محصولی که در آن مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری و بازتولیدی را با در نظر گرفتن هم‌زمان جریان روبه جلو و معکوس تصمیم‌گیری می‌شد، ارائه کردند. هدف مسئله نیز کمینه کردن هزینه‌های ثابت، حمل‌ونقل و پردازش بود و برای حل مدل از روش تجزیه بندرز بهره گرفتند. چوینارد [۱۲] یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی تقاضا، کیفیت و نرخ برگشتی ارائه کردند. آن‌ها از روش میانگین نمونه مبتنی بر روش مونت کارلو مسئله خود را حل کردند. دو و اوانس [۱۳] یک مدل دو هدفه که شامل کمینه کردن هزینه‌های کل و کمینه کردن زمان تأخیر چرخه را بیان کردند و از ترکیب سیمپلکس دوگان و جست‌وجوی پراکنده در روش حد دار برای حل مسئله خود استفاده کردند. لی و همکاران [۱۴]، یک مدل ریاضی

برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با ارائه یک‌رویه ابتکاری الگوریتم ژنتیک فرمول‌بندی کردند. مدل ارائه‌شده گرچه می‌توانست تعداد بهینه مراکز پردازش و جداسازی را تعیین کند، اما در مورد بخش‌های تأمین‌کننده ناکارآمد بود. پیشوایی [۱۵] یک مدل بهینه‌سازی قطعی برای شبکه زنجیره تأمین معکوس ارائه و سپس مدل برنامه‌ریزی احتمالی بر اساس سناریو را توسعه دادند. هدف مدل کاهش هزینه‌های شبکه با در نظر گرفتن احتمالی تقاضا و نرخ برگشتی طراحی‌شده بود. کین و جی [۱۶] یک شبکه لجستیک معکوس را با سه نوع مدل ریاضی طراحی کردند. در مدل اول و دوم هزینه مورد انتظار و هزینه کل و در مدل سوم اعتبار آن بیشینه می‌شد. از ویژگی‌های منحصربه‌فرد این مقاله در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها به‌صورت فازی مثلثی و استفاده از روش‌های شبیه‌سازی فازی و الگوریتم ژنتیک برای حل مدل می‌باشد. کارا و اونت [۱۷]، یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس باهدف بیشینه‌سازی سود ارائه کردند. آن‌ها از روش ترکیبی بهینه‌سازی استوار و احتمالی برای حل مسئله خود استفاده کردند. در این مدل پارامترهای تقاضا و نرخ برگشتی غیرقطعی در نظر گرفته‌شده بود. پیشوایی و همکاران [۱۸] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دو هدفه را گسترش دادند که اهداف آن شامل کمینه کردن هزینه کل شبکه و بیشینه کردن پاسخگویی را در یک شبکه لجستیک دربر می‌گرفت، آن‌ها الگوریتم ممیک را برای حل مسئله به کار بردند. همچنین آن‌ها یک مدل دو هدفه فازی چند دوره‌ای، برای زنجیره تأمین حلقه بسته طراحی کردند. در این مدل پارامترهای تقاضا، نرخ برگشت، هزینه‌های حمل‌ونقل و عملیاتی و همچنین زمان تحویل غیرقطعی در نظر گرفته‌شده بود. پیشوایی و ربانی [۱۹] یک مدل یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح آمیخته برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته طراحی و از روش بهینه‌سازی استوار برای کنترل عدم قطعیت مدل استفاده کردند. پیپلانی و همکارش [۲۰] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای کمینه کردن اهداف و تعادل جریان بین محدودیت‌ها پیشنهاد دادند. آن‌ها همچنین از یک‌رویه بهینه‌سازی استوار برای طراحی شبکه خدمات در لجستیک معکوس بهره بردند. محمودی و همکاران [۲۱] یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین معکوس که شامل هزینه‌های حمل‌ونقل، عملیاتی، نگهداری و بازتولید بودند ارائه کردند. هدف مدل آن‌ها کمینه کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و تولید با توجه به مکان‌یابی تسهیلات، هزینه‌های نگهداری و بازتولید به‌صورت هم‌زمان بود. دونمز و تورکای [۲۲] یک مدل مکان‌یابی تسهیلات چندهدفه برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط غیرقطعی بودن تقاضا و برگشتی محصولات ارائه و به تأثیر تقاضا و برگشتی تحت شرایط عدم قطعیت در پیکربندی شبکه با روش برنامه‌ریزی احتمالی پرداختند. امین و ژانگ [۲۳] یک مدل احتمالی چندهدفه برای طراحی یکپارچه لجستیک روبه‌جلو و معکوس با در نظر گرفتن پاسخگویی و سطح کیفیت ارائه کردند.

اوزجیلان و همکاران [۲۴] یک مدل یکپارچه برای بهینه‌سازی تصمیمات استراتژیک مربوط به مقدار جریان کالا در زنجیره‌های روبه‌جلو و معکوس و بهینه‌سازی تصمیمات تاکتیکی در بالانس خط تولید در زنجیره تأمین معکوس ارائه دادند. آن‌ها مدل غیرخطی عدد صحیح آمیخته را باهدف کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، خرید، بازسازی و عملیات دمونتازژ گسترش دادند. سلیمانی و همکاران [۲۵] یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته چند محصولی باهدف کاهش هزینه ارائه کردند. آن‌ها در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته احتمالی را برای این مدل گسترش دادند و پارامترهای تقاضا، قیمت خرید و نرخ برگشت را غیرقطعی در نظر گرفتند. رضایی و همکاران [۲۶] یک مدل زنجیره تأمین سبز احتمالی ارائه دادند، آن‌ها تقاضا و قیمت کربن را به‌عنوان پارامترهای عدم قطعیت در نظر گرفتند و تحلیل حساسیتی بر روی قیمت کربن و تقاضا انجام دادند.

با توجه به‌مرور ادبیات انجام‌شده متوجه می‌شویم هرکدام از مقالات با در نظر گرفتن برخی فرضیات محدودکننده، به ساخت یا گسترش یک مدل شبکه زنجیره تأمین پرداخته‌اند. به‌گونه‌ای که در این مقالات یک مدل جامع که دربرگیرنده فرضیاتی که به دنیای واقعی نزدیک‌تر باشد، کمتر به چشم می‌خورد. لذا از این‌رو، این مقاله که یک مدل نوین در ادامه رفع برخی از محدودیت‌ها و فرضیات سایر مقالات هست، به یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته اشاره دارد که درصدد مکان‌یابی تسهیلات بالقوه و بهینه‌سازی مقدار جریان بین تسهیلات با در نظر گرفتن عامل تخفیف و کمبود قابل جبران است که در سایر مقالات به‌صورت یکپارچه بررسی نشده است. برای نزدیکی هرچه بیشتر مدل توسعه‌یافته با دنیای واقعی، پارامترهایی نظیر تقاضای مشتری در هر دوره، هزینه‌های حمل‌ونقل مواد خام و محصولات، قیمت خرید مواد خام و میزان نرخ برگشت محصولات مصرف‌شده، غیرقطعی در نظر گرفته‌شده است. این مقاله برخلاف سایر مقالات، تسهیلات انتخاب‌شده در هر دوره بنا به‌ضرورت نیاز قابلیت باز و بسته‌شده با اعمال هزینه‌های مربوطه در هر دوره را دارند. همچنین با در نظر گرفتن انواع وسایل نقلیه باری برای حمل مواد خام و محصولات، مدل پیشنهادی درصدد کاهش هزینه و کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ازجمله CO₂ در بین پارامترهای غیرقطعی می‌باشد. مدل پیشنهادی در دو رویکرد قطعی و بهینه‌سازی استوار، مدل‌سازی و با روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه حل و مقایسه شده‌اند تا بهترین روش در هر دو رویکرد حاصل شود.

بخش‌بندی این مقاله به این صورت می‌باشد. در بخش ۲ این مقاله، به تعریف مسئله و مدل‌سازی پرداخته‌شده است که در قسمت اول به مدل‌سازی در حالت رویکرد قطعی، در قسمت دوم به مدل‌سازی در حالت رویکرد استوار و در قسمت آخر، خطی‌سازی مدل پیشنهادی ارائه‌شده است. در بخش ۳، روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مورد استفاده در این مقاله اشاره‌شده است، بخش ۴، به

تعمیر، مراکز بازیافت و مراکز انهدام، تعیین مقدار بهینه جریان بین مراکز و تعیین سطح مناسب تخفیف با در نظر گرفتن موضوع زیست‌محیطی می‌باشد.

برای مدل‌سازی مجموعه، پارامتر و متغیرهای مسئله به صورت زیر تعریف می‌شوند.

مجموعه‌ها

S	مجموعه نقاط بالقوه مراکز تأمین‌کننده مواد خام
M	مجموعه نقاط بالقوه کارخانه‌های تولیدی
W	مجموعه نقاط بالقوه انبارها
E	مجموعه نقاط بالقوه مراکز توزیع و جمع‌آوری
C	مجموعه نقاط ثابت مشتریان
R	مجموعه نقاط بالقوه مراکز تعمیر
U	مجموعه نقاط بالقوه مراکز بازیافت
L	مجموعه نقاط بالقوه مراکز انهدام
I	مجموعه مواد خام
P	مجموعه محصولات نهایی
H	مجموعه سطوح تخفیف
N	مجموعه وسیله نقلیه باری
T	مجموعه دوره‌های زمانی

با فرض $\vartheta^f = (G^1, A', A'')$ و $\vartheta^r = (G^2, A''', A''')$ که در آن گره‌های گراف و A کمان‌های گراف طبق تعاریف زیر می‌باشند.

$$\begin{aligned}
 G^1 &= \{S \cup M \cup W \cup E \cup C\} \\
 A' &= \left\{ (j, j') \mid \begin{array}{l} (i \in M, j \in W) \cup (i \in W, j \in E) \\ \cup (i \in E, j \in C) \end{array} \right\} \\
 A'' &= \{(j, j') \mid (i \in S, j \in M)\} \\
 G^2 &= \{C \cup E \cup R \cup U \cup L\} \\
 A''' &= \left\{ (j, j') \mid \begin{array}{l} (i \in C, j \in E) \cup (i \in E, j \in R) \\ \cup (i \in E, j \in U) \\ \cup (i \in R, j \in E) \cup (i \in R, j \in W) \end{array} \right\} \\
 A'''' &= \{(j, j') \mid (i \in U, j \in L) \cup (i \in U, j \in M)\} \\
 G &= \{G^1 \cup G^2\} - C \\
 A_1 &= \{A'' \cup A''''\} \\
 A_2 &= \{A' \cup A'''\}
 \end{aligned}$$

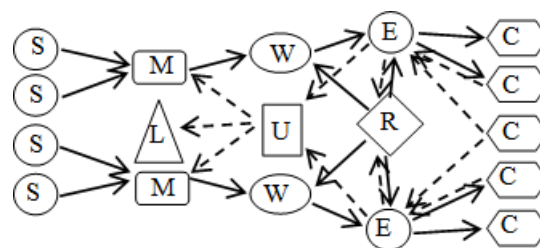
پارامترها

$f i_{jt}$	هزینه ثابت سالیانه تسهیل j در دوره زمانی t
op_{jt}	هزینه تأسیس تسهیل j در دوره زمانی t
cl_{jt}	هزینه بستن تسهیل j در دوره زمانی t
$TC_{jj'in}$	هزینه حمل‌ونقل یک واحد ماده خام i بین تسهیلات $(j, j') \in A_1$ توسط حمل‌کننده باری n
$TC_{jj'pn}$	هزینه حمل‌ونقل یک واحد محصول p بین تسهیلات $(j, j') \in A_2$ توسط حمل‌کننده باری n
$Co_{2jj'in}$	میزان انتشار گاز Co_2 به ازای یک واحد ماده خام i بین تسهیلات $(j, j') \in A_1$ توسط حمل‌کننده باری n
$Co_{2jj'pn}$	میزان انتشار گاز Co_2 به ازای یک واحد محصول p بین

نتایج محاسبات عددی مدل‌های پیشنهادی در دو حالت رویکرد قطعی و استوار و مقایسه آن‌ها پرداخته است. درنهایت در بخش ۵، نتیجه‌گیری و پیشنهادها آتی ارائه شده است.

۲- تعریف مسئله و مدل‌سازی

در این مقاله یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ۹ سطحی در نظر گرفته شده است. شبکه روبه‌جلو شامل سطوح تأمین‌کننده مواد خام، مراکز تولیدی، انبار، مراکز توزیع‌کننده محصولات و مشتریان نهایی هستند. شبکه معکوس نیز شامل سطوح مراکز جمع‌آوری، مراکز تعمیر، مراکز بازیافت و مراکز اندام می‌باشد. مطابق شکل (۱) در مسیر جریان روبه‌جلو، تأمین‌کننده مواد خام، مواد خام موردنیاز برای تولید محصولات را به مراکز تولیدی ارسال می‌کند. مواد خام پس از مونتاژ در مراکز تولیدی به انبار محصولات ارسال و ذخیره‌سازی می‌شود. مراکز توزیع‌کننده محصولات، پس از دریافت محصولات از انبار، آن را به مشتریان نهایی ارسال می‌کند. در مسیر رو به عقب نیز، درصدی از محصولات مصرف‌شده مشتری، توسط مراکز جمع‌آوری، جمع‌آوری می‌شود و پس از بازرسی محصولات، آن محصولات که قابل تعمیر باشند به مراکز تعمیر و مابقی به مراکز بازیافت ارسال می‌گردد. محصولات تعمیر شده در مرکز تعمیر، درنهایت به مراکز توزیع‌کننده و یا انبار بالقوه ارسال می‌گردد. محصولات قابل بازیافت نیز، پس از دمونتاژ در مراکز بازیافت، در صورتی که قابل استفاده باشند، به کارخانه تولیدی جهت استفاده مجدد و در غیر این صورت برای دفع، به مراکز اندام ارسال می‌گردد.



شکل (۱): شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی

برای مشخص کردن حوزه مطالعه، مفروضات زیر را برای مدل پیشنهادی خود در نظر می‌گیریم:

۱. تخفیف اعمال‌شده توسط تأمین‌کننده مواد خام از نوع تخفیف مقداری می‌باشد.
۲. مقدار موجودی مواد خام در انبار مراکز تولیدی و محصولات نهایی در انبارهای بالقوه برابر صفر است.
۳. تمامی مراکز دارای ظرفیت محدود و مشخص می‌باشد.
۴. مکان تمامی مراکز، بالقوه و نامشخص می‌باشد.
۵. تقاضای مشتریان بایستی تا آخرین دوره زمانی برآورده گردد.
۶. ظرفیت وسایل نقلیه باری نامحدود در نظر گرفته شده است.

با در نظر گرفتن مفروضات بالا، مهم‌ترین موضوع اشاره شده در این مقاله، انتخاب و مکان‌یابی مراکز تأمین‌کننده مواد خام، مراکز تولیدی، انبار، مراکز دوگانه توزیع‌کننده محصولات/جمع‌آوری، مراکز

متغیرهای تصمیم	تسهیلات $(j, j') \in A_2$ توسط حمل‌کننده باری n	
مقدار ماده خام i که توسط وسیله نقلیه باری n بین تسهیلات $(j, j') \in A_1$ در دوره t انتقال می‌یابد.	هزینه نگهداری یک واحد ماده خام i در مرکز انبار m در انتهای دوره t	h_{mit}
مقدار محصول p که توسط وسیله نقلیه باری n بین تسهیلات $(j, j') \in A_2$ در دوره t انتقال می‌یابد.	هزینه نگهداری یک واحد محصول p در مرکز انبار w در انتهای دوره t	h'_{wpt}
مقدار موجودی ماده خام i در انبار مواد خام کارخانه m در انتهای دوره t	قیمت خرید یک واحد ماده خام i در سطح تخفیف h از سوی تأمین‌کننده s در دوره t	Pr_{shit}
مقدار موجودی محصول p در انبار w در انتهای دوره t	حد پایین بازه تخفیف ماده خام i در سطح تخفیف h از سوی تأمین‌کننده s در دوره t	VA_{shit}
مقدار کل خرید ماده خام i از تأمین‌کننده s در دوره t	هزینه تولید یک واحد محصول p در کارخانه m در دوره t	C_{1mpt}
میزان کمبود محصول p از مشتری c در دوره t	هزینه توزیع یک واحد محصول p توسط مرکز توزیع e در دوره t	C_{2ept}
در صورتی که مرکز تسهیل $j \in G$ در دوره t تأسیس گردد، مقدار 1 و در غیر این صورت 0 می‌گیرد.	هزینه جمع‌آوری یک واحد محصول برگشتی p توسط مرکز جمع‌آوری e در دوره t	C_{3ept}
در صورتی که سطح تخفیف h برای ماده خام i در مرکز تسهیل $j \in S$ در دوره t انتخاب گردد، مقدار 1 و در غیر این صورت 0 می‌گیرد.	هزینه تعمیر یک واحد محصول p در مرکز تعمیر r در دوره t	C_{4rpt}
	هزینه بازیافت یک واحد محصول p در مرکز بازیافت u در دوره t	C_{5upt}
	هزینه انهدام یک واحد ماده خام i در مرکز انهدام l در دوره t	C_{6lit}
	هزینه جریمه مواجه با کمبود یک واحد محصول p از مشتری c در دوره t	π_{cpt}
	تعداد ماده خام i موردنیاز برای ساخت یک محصول p	δ_{ip}
	تقاضای مشتری c از محصول p در دوره t	De_{cpt}
	درصدی از محصول p برگشتی از مشتری c در دوره t	α_{cpt}
	درصدی از محصول p قابل تعمیر در دوره t	β_{pt}
	درصدی از محصول p انتقالی به مرکز توزیع در دوره t	γ_{pt}
	درصدی از مواد خام قابل استفاده i در دوره t	θ_{it}
	ظرفیت تأمین ماده خام i از تأمین‌کننده s	cap_{si}
	ظرفیت انبار ماده خام i در انبار مواد خام کارخانه m	cap_{mi}
	ظرفیت تولید محصول p در کارخانه m	cap_{mp}
	ظرفیت انبار محصول نهایی p در انبار w	cap_{wp}
	ظرفیت توزیع محصول p در مرکز توزیع e	cap_{ep}
	ظرفیت محصول برگشتی p در مرکز جمع‌آوری e	cap'_{ep}
	ظرفیت تعمیر محصول قابل تعمیر p در مرکز تعمیر r	cap_{rp}
	ظرفیت بازیافت محصول قابل بازیافت p در مرکز بازیافت u	cap_{up}
	ظرفیت انهدام ماده i در مرکز انهدام l	cap_{li}
	یک عدد بسیار بزرگ نا منفی	M

۲-۱- مدل برنامه‌ریزی غیرخطی رویکرد قطعی

$$\begin{aligned} \min z1 &= \sum_{j \in G} \sum_{t \in T} \left(fi_{jt} Y_{jt} + op_{jt} Y_{jt} (1 - Y_{j,t-1}) + cl_{jt} Y_{jt} (1 - Y_{j,t+1}) \right) \\ &+ \sum_{(j,j') \in A_1} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} tc_{jj'in} X_{jj'itn} \\ &+ \sum_{(j,j') \in A_2} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} tc_{jj'pn} X_{jj'ptn} \\ &+ \sum_{j \in W} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h'_{jpt} IQ_{jpt} + \sum_{j \in M} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} h_{jit} VQ_{jit} \\ &+ \sum_{j \in S} \sum_{j' \in M} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} pr_{jh} A_{jh} X_{jj'itn} \\ &+ \sum_{j \in M} \sum_{j' \in W} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} C_{1jpt} X_{jj'ptn} \\ &+ \sum_{j \in E} \sum_{j' \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (C_{2jpt} X_{jj'ptn} + C_{3jpt} X_{j'jptn}) \\ &+ \sum_{j \in E} \sum_{j' \in R} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} C_{4j'pt} X_{jj'ptn} \\ &+ \sum_{j \in E} \sum_{j' \in U} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} C_{5j'pt} X_{jj'ptn} \\ &+ \sum_{j \in U} \sum_{j' \in L} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} C_{6j'it} X_{jj'itn} \\ &+ \sum_{j \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \pi_{jpt} Sh_{jpt} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \min z2 &= \sum_{(j,j') \in A_1} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} co2_{jj'in} X_{jj'itn} \\ &+ \sum_{(j,j') \in A_2} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} co2_{jj'pn} X_{jj'ptn} \\ &S.t. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in W} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + \sum_{j \in R} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq cap_{j'p} Y_{j't}, \quad (21)$$

$$\forall j' \in E, p, t$$

$$\sum_{j \in C} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq cap'_{j'p} Y_{j't}, \quad \forall j' \in E, p, t \quad (22)$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq cap_{j'p} Y_{j't}, \quad \forall j' \in U, p, t \quad (23)$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq cap_{j'p} Y_{j't}, \quad \forall j' \in R, p, t \quad (24)$$

$$\sum_{j \in U} \sum_{n \in N} X_{jj'itn} \leq cap_{j'i} Y_{j'i}, \quad \forall j' \in L, i, t \quad (25)$$

$$Y_{j,t-1} = 0, \quad \forall j \in G, t = 1 \quad (26)$$

$$Y_{j,t+1} = 0, \quad \forall j \in G, t = T \quad (27)$$

$$X_{jj'itn}, VQ_{mit}, Q_{sit} \geq 0, \quad \forall (j, j') A_1, i, n, t, s, m \quad (28)$$

$$X_{jj'ptn}, IQ_{wpt}, sh_{cpt} \geq 0, \quad \forall (j, j') \in A_2, p, n, t, w, c \quad (29)$$

$$Y_{jt} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in G, t \quad (30)$$

تابع هدف (۱) درصد کمینه‌سازی هزینه‌های کل شبکه زنجیره تأمین می‌باشد. این هزینه‌ها به ترتیب شامل: هزینه‌های ثابت سالیانه، ایجاد و بستن یک تسهیل، هزینه‌های حمل‌ونقل مواد خام و محصولات بین تسهیلات، هزینه‌های نگهداری مواد خام و محصولات نهایی در انبار مرتبط، هزینه‌های عملیاتی مرتبط با هر تسهیل (هزینه تولید، توزیع، جمع‌آوری، تعمیر، بازیافت، انهدام) و درنهایت هزینه‌های جریمه مواجه با کمبود محصول می‌باشد.

معادله (۲) تابع هدف دوم مسئله در ارتباط با کمینه‌سازی میزان گاز CO_۲ منتشرشده توسط حرکت وسایل نقلیه باری بین مراکز تسهیلات را نشان می‌دهد.

محدودیت در نامعادله (۳) مقدار کل مواد خام خریداری‌شده از سطوح تخفیف تأمین‌کنندگان را بیان می‌کند. محدودیت در معادله (۴) تضمین می‌کند در صورتی که تأمین‌کننده بالقوه انتخاب گردد، در هر دوره تنها از یک سطح تخفیف آن می‌توان مواد خام خریداری نمود. محدودیت در معادله (۵) کل خرید ماده خام انجام‌شده از تأمین‌کنندگان را به کارخانه‌های تولیدی ارسال می‌کند. محدودیت در معادله (۶) حجم جریان ماده خام ورودی از تأمین‌کننده و مرکز بازیافت به کارخانه را نشان می‌دهد، بخشی از ماده خام پس از تولید محصول در انبار کارخانه ذخیره می‌گردد. محدودیت در معادله (۷)، حجم جریان ورودی و خروجی به انبار را کنترل می‌کند. معادله (۸)، محدودیت تعادلی بر روی مرکز توزیع را نشان می‌دهد و تضمین می‌کند حجم جریان ورودی از مرکز تعمیر و انبار به مرکز توزیع برابر با حجم جریان خروجی از مرکز توزیع به مشتری است. محدودیت در معادله (۹) تضمین می‌کند، تقاضای مشتری بایستی تا آخرین دوره افق زمانی برآورده گردد. محدودیت در معادله (۱۰) درصدی از محصولات دورریز مشتری در هر دوره را نشان می‌دهد. محدودیت‌ها در معادله (۱۱-۱۲) بیان می‌کند، مرکز جمع‌آوری، پس از بازرسی

$$A_{jhit} V A_{jhit} \leq Q_{jit}, \quad \forall j \in S, h, i, t \quad (3)$$

$$\sum_{h \in H} A_{jhit} = Y_{jt}, \quad \forall j \in S, i, t \quad (4)$$

$$Q_{jit} = \sum_{j' \in M} \sum_{n \in N} X_{jj'itn}, \quad \forall j \in S, i, t \quad (5)$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{n \in N} X_{jj'itn} + \sum_{j \in U} \sum_{n \in N} X_{jj'itn} - VQ_{j'it} + VQ_{j'i,t-1} = \sum_{j \in W} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{j'jpnt} \delta_{ip}, \quad \forall j' \in M, i, t \quad (6)$$

$$\sum_{j \in M} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + \sum_{j \in R} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + IQ_{j'p,t-1} - \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{j'jpnt} = IQ_{j'pt}, \quad \forall j' \in W, p, t \quad (7)$$

$$\sum_{j \in W} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + \sum_{j \in R} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in C} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \quad (8)$$

$$De_{j'p,t} + sh_{j'p,t-1} - sh_{j'pt} = \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn}, \quad \forall j' \in C, p, t \quad (9)$$

$$\alpha_{j'pt} \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'p,t-1,n} = \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{j'jpnt}, \quad \forall j' \in C, p, t \quad (10)$$

$$\beta_{pt} \sum_{j \in C} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in R} \sum_{n \in N} X_{j'jpnt}, \quad \forall j' \in E, p, t \quad (11)$$

$$(1 - \beta_{pt}) \sum_{j \in C} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in U} \sum_{n \in N} X_{j'jpnt}, \quad \forall j' \in E, p, t \quad (12)$$

$$\gamma_{pt} \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{j'jpnt}, \quad \forall j' \in E, p, t \quad (13)$$

$$(1 - \gamma_{pt}) \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in W} \sum_{n \in N} X_{j'jpnt}, \quad \forall j' \in E, p, t \quad (14)$$

$$\theta_{it} \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{jj'ptn} \delta_{ip} = \sum_{j \in M} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{j'jitn}, \quad \forall j' \in U, i, t \quad (15)$$

$$(1 - \theta_{it}) \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{jj'ptn} \delta_{ip} = \sum_{j \in L} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{j'jitn}, \quad \forall j' \in U, i, t \quad (16)$$

$$\sum_{j \in M} \sum_{n \in N} X_{jj'itn} \leq cap_{ji} Y_{jt}, \quad \forall j \in S, i, t \quad (17)$$

$$VQ_{jit} \leq cap_{ji} Y_{jt}, \quad \forall j \in M, i, t \quad (18)$$

$$\sum_{j' \in W} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq cap_{jp} Y_{jt}, \quad \forall j \in M, p, t \quad (19)$$

$$IQ_{jpt} \leq cap_{jp} Y_{jt}, \quad \forall j \in W, p, t \quad (20)$$

در این مدل، پارامترهای c, d, A, b در مجموعه غیرقطعی U به شکل متغیر فرض شده‌اند. بردار x ، یک جواب شدنی استوار برای مسئله (۳۳) هست، در صورتی که بتواند تمامی محدودیت‌های دارای پارامتر غیرقطعی متعلق به مجموعه U را برآورده سازد. بر اساس مقاله بنتال و نمیروسکی، مدل استوار مسئله (۳۳) به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \sup \\ (c, d, A, b \in U) [cx + d] \\ : Ax \leq b \forall c, d, A, b \in U \end{array} \right\} \quad (36)$$

جواب بهینه مسئله (۳۶)، جواب بهینه استوار برای مسئله (۳۳) خواهد بود. این جواب بهینه محدودیت‌های مسئله را برای تمامی داده‌های ممکن در مجموعه U برآورده می‌کند و بهینه بودن تابع هدف را طوری ضمانت می‌کند که حتی در بدترین حالت از $\hat{C}(x^*)$ بیشتر نباشد. مسئله (۳۶) یک مسئله بهینه‌سازی خطی نیمه-بیکران می‌باشد و از لحاظ محاسباتی، نشدنی محسوب می‌شود. با این وجود برای مجموعه‌های محدب به نظر می‌رسد که مدل (۳۶) به یک مسئله چندجمله‌ای محدب که از نظر محاسباتی شدنی خواهد بود، تبدیل خواهد شد. برای درک بهتر می‌توان مدل (۳۱) را برای مسئله مدیریت زنجیره تأمین به شکل زیر تعریف کرد:

$$\text{Min } fy + cx \quad (37)$$

S. t.

$$Ax \geq d \quad (38)$$

$$Hx = r \quad (39)$$

$$Nx = 0 \quad (40)$$

$$Mx \leq 0 \quad (41)$$

$$Bx \leq Cy \quad (42)$$

$$y \in \{0,1\}, x \in R^+ \quad (43)$$

بردارهای d, r, c, f به ترتیب متناظر با هزینه ثابت بازگشایی، هزینه حمل‌ونقل، محصولات برگشتی و تقاضای محصول می‌باشد. ماتریس‌های N, M, C, B, A ماتریس ضرایب متناظر در محدودیت‌ها می‌باشد. همین‌طور تمامی متغیرهای صفر و یک را در قالب بردار y و تمامی متغیرهای پیوسته تصمیم‌گیری در قالب بردار x تعریف شده‌اند.

برای توصیف مدل استوار متناظر با مدل (۳۷) پارامترهای تقاضا، محصولات برگشتی، هزینه حمل‌ونقل کالا بین مراکز مختلف به شکل غیرقطعی فرض شده‌اند. فرض بر این است که هر یک از این پارامترهای غیرقطعی می‌توانند در یک چارچوب محدود تعریف شده، تغییر کنند. شکل عمومی این چارچوب را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$u_{box} = \{\xi \in R^n : |\xi_t - \bar{\xi}_t| \leq \rho G_t \quad t = 1, \dots, n\} \quad (44)$$

که $\bar{\xi}_t$ ارزش اسمی، ξ_t از t امین پارامتر بردار ξ می‌باشد (یک بردار n بعدی است). همچنین ρ مقدار مثبت G_t و به ترتیب نشان‌دهنده میزان عدم قطعیت و سطح عدم قطعیت می‌باشد. بنا بر توضیحات بالا مدل استوار متناظر با مدل به شکل زیر خواهد بود.

محصولات، در صدی از آن را که قابل تعمیر می‌باشد، به مرکز تعمیر و مابقی محصولات را به مرکز بازیافت ارسال می‌کند. محدودیت‌ها در معادله (۱۳-۱۴) نشان می‌دهد، مرکز تعمیر، پس از تعمیر محصولات برگشتی، در صدی از آن را به مرکز توزیع و در صدی از محصولات را به انبار ارسال می‌کند. محدودیت‌ها در معادله (۱۵-۱۶) نیز نشان می‌دهد، مرکز بازیافت، پس از بازرسی محصولات و دمونتاژ محصولات، در صدی از مواد خام را که قابل استفاده می‌باشد به کارخانه تولیدی و مابقی محصولات را برای انهدام به مرکز انهدام ارسال می‌کند. محدودیت‌ها در نامعادله (۱۷) تا (۲۵) بیانگر محدودیت‌های مرتبط با ظرفیت تسهیلات شبکه می‌باشد، بدین صورت که محدودیت در نامعادله (۱۷)، حداکثر ظرفیت تأمین‌کننده از تهیه مواد خام را نشان می‌دهد. محدودیت در نامعادله (۱۸) میزان ذخیره هر ماده خام در انبار کارخانه را محدود می‌کند. محدودیت در نامعادله (۱۹)، حداکثر ظرفیت تولید از هر محصول را برای کارخانه‌هایی که ایجاد شده‌اند، بیان می‌کند. محدودیت در نامعادله (۲۰) تضمین می‌کند در صورتی که انباری ایجاد شود، حداکثر میزان ذخیره محصولات از ظرفیت انبار نمی‌تواند تجاوز کند. محدودیت (۲۱-۲۲) بیان می‌کند در صورتی که مرکز دوگانه جمع‌آوری و بازیافت ایجاد شود، میزان توزیع و جمع‌آوری از ظرفیت این تسهیل تجاوز نمی‌کند. محدودیت در نامعادله (۲۳) حداکثر میزان توانایی بازیافت محصولات در مرکز بازیافت را نشان می‌دهد. محدودیت در نامعادله (۲۴) تضمین می‌کند، در صورتی که مرکز تعمیر تأسیس گردد، حداکثر محصولات قابل تعمیر از ظرفیت تعمیر مرکز مذکور تجاوز نمی‌کند. محدودیت در نامعادله (۲۵) نیز ظرفیت انهدام مواد خام غیرقابل استفاده را محدود می‌کند. محدودیت‌های (۲۶-۲۷) مقدار متغیر موجود در تابع هدف را به ازای دوره‌های خاصی صفر می‌کند. محدودیت‌های (۲۸) تا (۳۰) نوع متغیرهای تصمیم و مقادیر مجاز برای آن‌ها را در مسئله بیان می‌کند.

۲-۲- مدل برنامه‌ریزی غیرخطی رویکرد استوار

مدل پیشنهادی ارائه شده در حالت دوم، مربوط به حالت غیرقطعی مدل می‌باشد. این مدل بر اساس مدل بهینه‌سازی استوار ارائه شده توسط بنتال و نمیروسکی [۲۷، ۲۸]، توسعه داده شده است.

مدل بهینه‌سازی خطی و قطعی زیر را در نظر بگیرید.

$$\text{Min } cx + d \quad (31)$$

S. t.

$$Ax \leq b \quad (32)$$

بر اساس مقاله بنتال و نمیروسکی، مدل بهینه‌سازی خطی غیرقطعی که شامل یک مجموعه از مسائل بهینه‌سازی خطی است، به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\text{Min } cx + d \quad (33)$$

S. t.

$$Ax \leq b \quad (34)$$

$$c, d, A, b \in U \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
 h_j x &\geq \bar{r}_j - \rho_r G_j^r, \quad \forall t \in \{1, \dots, n_d\} & (۶۷) \\
 h_j x &\leq \bar{r}_j + \rho_r G_j^r, \quad \forall t \in \{1, \dots, n_r\} & (۶۸) \\
 Nx &= 0 & (۶۹) \\
 Mx &\leq 0 & (۷۰) \\
 Bx &\leq Cy & (۷۱) \\
 y &\in \{0, 1\}, x \in R^+ & (۷۲)
 \end{aligned}$$

پیش از این پیشوایی و ربانی [۱۹] یک مدل تک هدفه با رویکرد استوار برای کاهش هزینه شبکه مسئله زنجیره تأمین ارائه کردند، علاوه بر این وحدانی و توکلی مقدم [۲۹] مدل چندهدفه با رویکرد استوار برای یک مسئله زنجیره تأمین مطرح کردند، درحالی که در این مدل پیشنهادی هدف سبز بودن در کنار سایر اهداف بررسی می‌گردد. در این مدل، پارامترهایی نظیر تقاضا، میزان نرخ محصولات برگشتی، هزینه‌های حمل‌ونقل و همچنین قیمت خرید مواد خام توسط تأمین‌کننده غیرقطعی در نظر گرفته شده است. با توجه به مجموعه، پارامتر و متغیرهای تصمیم بیان شده مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی عدد آمیخته به صورت ذیل می‌باشد:

$$\text{Min } Z_1 \quad (۷۳)$$

$$\text{Min } Z_2 \quad (۷۴)$$

S. t.

$$\begin{aligned}
 &\sum_{j \in G} \sum_{t \in T} \left(f i_{jt} Y_{jt} + o p_{jt} Y_{jt} (1 - Y_{j,t-1}) \right. \\
 &\quad \left. + c l_{jt} Y_{jt} (1 - Y_{j,t+1}) \right) \\
 &+ \sum_{(j,j') \in A_1} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (\bar{c} c_{jj'itn} X_{jj'itn} + \eta_{jj'itn}^{tc}) \\
 &+ \sum_{(j,j') \in A_2} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (\bar{c} c_{jj'ptn} X_{jj'ptn} + \eta_{jj'ptn}^{tc}) \\
 &+ \sum_{j \in S} \sum_{j' \in M} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} (\bar{p} r_{jh} i t A_{jh} i t X_{jj'itn} \\
 &+ \eta_{jh} i n^{pr}) + \sum_{j \in M} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} h_{jit} V Q_{jit} \\
 &+ \sum_{j \in W} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h'_{jit} I Q_{jpt} \\
 &+ \sum_{j \in M} \sum_{j' \in W} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} C_{1jpt} X_{jj'ptn} \\
 &+ \sum_{j \in E} \sum_{j' \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (C_{2jpt} X_{jj'ptn} \\
 &+ C_{3jpt} X_{j'jptn}) \\
 &+ \sum_{j \in E} \sum_{j' \in R} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} C_{4j'pt} X_{jj'ptn} \\
 &+ \sum_{j \in E} \sum_{j' \in U} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} C_{5j'pt} X_{jj'ptn} \\
 &+ \sum_{j \in U} \sum_{j' \in L} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} C_{6j'it} X_{jj'itn} \\
 &+ \sum_{j \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \pi_{jpt} S h_{jpt} \leq Z_1 \\
 &\sum_{(j,j') \in A_1} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} c o 2_{jj'itn} X_{jj'itn} & (۷۵)
 \end{aligned}$$

$$\sum_{(j,j') \in A_1} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} c o 2_{jj'itn} X_{jj'itn} \quad (۷۶)$$

$$\text{Min } Z \quad (۴۵)$$

S. t.

$$f y + c x \leq z, \quad \forall c \in u_{Box}^c \quad (۴۶)$$

$$A x \geq d, \quad \forall d \in u_{Box}^d \quad (۴۷)$$

$$H x = r, \quad \forall r \in u_{Box}^r \quad (۴۸)$$

$$N x = 0 \quad (۴۹)$$

$$M x \leq 0 \quad (۵۰)$$

$$B x \leq C y \quad (۵۱)$$

$$y \in \{0, 1\}, x \in R^+ \quad (۵۲)$$

بنال و همکاران نشان دادند که در یک چارچوب محدود مدل استوار می‌تواند از یک مسئله نیمه-بیکران نشدنی به یک مسئله تعادلی شدنی تبدیل نمود که در آن مجموعه u_{Box} به مجموعه کران‌دار u_{ext} جایگزین می‌شود. در این مسئله شامل حداکثر مقادیر موجود در مجموعه u_{Box} می‌باشد. برای نشان دادن فرم شدنی مسئله (۴۵) بایستی محدودیت‌های (۴۶)، (۴۷) و (۴۸) را به فرم شدنی خود درآورد. لذا برای محدودیت (۴۶) داریم:

$$c x \leq z - f y, \quad (۵۳)$$

$$\forall c \in u_{Box}^c | u_{Box}^c = \left\{ C \in R^{n_c} : |C_t - \bar{C}_t| \leq \rho_c G_t^c \right\} \\ t = 1, \dots, n_c$$

سمت چپ نامعادله (۵۳) دارای پارامتر نامعین می‌باشد. حال آنکه

تمامی پارامترهای سمت راست معین هستند؛ بنابراین شکل کنترل‌شده نامعادله نیمه-بیکران (۵۳) به فرم زیر خواهد بود:

$$\sum_t (\bar{C}_t x_t + \eta_t) \leq z - f y \quad (۵۴)$$

$$\rho_c G_t^c x_t \leq \eta_t, \quad \forall t \in \{1, \dots, n_c\} \quad (۵۵)$$

$$\rho_c G_t^c x_t \geq -\eta_t, \quad \forall t \in \{1, \dots, n_c\} \quad (۵۶)$$

برای محدودیت (۴۷) معادله کنترل‌شده نیمه-بیکران به شرح

زیر خواهد بود:

$$a_i x \geq d_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, n_d\} \quad (۵۷)$$

$$\forall d \in u_{Box}^d | u_{Box}^d = \{d \in R^{n_d} : |d_i - \bar{d}_i| \leq \rho_d G_i^d\}$$

$$a_i x \geq \bar{d}_i + \rho_d G_i^d, \quad \forall i \in \{1, \dots, n_d\} \quad (۵۸)$$

در نهایت معادله کنترل‌شده نیمه-بیکران مقدار محصولات

برگشتی معادل با محدودیت (۴۹) طبق رابطه زیر عمل خواهد کرد.

$$h_j x = r_j, \quad \forall j \in \{1, \dots, n_r\} \quad (۵۹)$$

$$\forall r \in u_{Box}^r | u_{Box}^r = \{r \in R^{n_d} : |r_j - \bar{r}_j| \leq \rho_r G_j^r\}$$

$$h_j x \geq \bar{r}_j - \rho_r G_j^r, \quad \forall j \in \{1, \dots, n_r\} \quad (۶۰)$$

$$h_j x \leq \bar{r}_j + \rho_r G_j^r, \quad \forall j \in \{1, \dots, n_r\} \quad (۶۱)$$

روابط زیر فرم کلی مدل استوار خطی را برای مسئله زنجیره

تأمین فرضی نشان می‌دهد.

$$\text{Min } Z, \quad \forall j \in \{1, \dots, n_r\} \quad (۶۲)$$

S. t.

$$\sum_t (\bar{C}_t x_t + \eta_t) \leq z - f y \quad (۶۳)$$

$$\rho_c G_t^c x_t \leq \eta_t, \quad \forall t \in \{1, \dots, n_c\} \quad (۶۴)$$

$$\rho_c G_t^c x_t \geq -\eta_t, \quad \forall t \in \{1, \dots, n_c\} \quad (۶۵)$$

$$a_i x \geq \bar{d}_i + \rho_d G_i^d, \quad \forall t \in \{1, \dots, n_d\} \quad (۶۶)$$

$$\forall j' \in R, p, t$$

$$\theta_{it} \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{jj'ptn} \delta_{ip} = \sum_{j \in M} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{j'j'itn}, \quad (96)$$

$$\forall j' \in U, i, t$$

$$(1 - \theta_{it}) \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{jj'ptn} \delta_{ip} = \sum_{j \in L} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{j'j'itn}, \quad (97)$$

$$\forall j' \in U, i, t$$

$$\sum_{j \in M} \sum_{n \in N} X_{jj'itn} \leq \text{cap}_{ji} Y_{jt}, \quad \forall j \in S, i, t \quad (98)$$

$$VQ_{jit} \leq \text{cap}_{ji} Y_{jt}, \quad \forall j \in M, i, t \quad (99)$$

$$\sum_{j' \in W} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq \text{cap}_{jp} Y_{jt}, \quad \forall j \in M, p, t \quad (100)$$

$$IQ_{jpt} \leq \text{cap}_{jp} Y_{jt}, \quad \forall j \in W, p, t \quad (101)$$

$$\sum_{j \in W} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + \sum_{j \in R} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq \text{cap}_{j'p} Y_{j't}, \quad (102)$$

$$\forall j' \in E, p, t$$

$$\sum_{j \in C} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq \text{cap}'_{j'p} Y_{j't}, \quad \forall j' \in E, p, t \quad (103)$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq \text{cap}_{j'p} Y_{j't}, \quad \forall j' \in U, p, t \quad (104)$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq \text{cap}_{j'p} Y_{j't}, \quad \forall j' \in R, p, t \quad (105)$$

$$\sum_{j \in U} \sum_{n \in N} X_{jj'itn} \leq \text{cap}_{j'i} Y_{j'i}, \quad \forall j' \in L, i, t \quad (106)$$

$$Y_{j,t-1} = 0, \quad \forall j \in G, t = 1 \quad (107)$$

$$Y_{j,t+1} = 0, \quad \forall j \in G, t = T \quad (108)$$

$$X_{jj'itn}, VQ_{mit}, Q_{sit}, \eta_{jj'in}^{tc}, \eta_{jhit}^{pr} \geq 0, \quad (109)$$

$$\forall (j, j') A_1, i, n, t, s, m, h$$

$$X_{jj'ptn}, IQ_{wpt}, sh_{cpt}, \eta_{jj'pn}^{tc} \geq 0, \quad (110)$$

$$\forall (j, j') A_2, p, n, t, w, c$$

$$Y_{jt} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in G, t \quad (111)$$

محدودیت‌ها در نامعادلات (۷۵) تا (۸۲) بیانگر فرمول‌بندی مربوط به رویکرد استوار می‌باشد. محدودیت‌های (۸۳) تا (۱۰۸) معادلات موجود در مدل پیشنهادی با رویکرد قطعی می‌باشد. محدودیت‌های (۱۰۹) تا (۱۱۱) نوع متغیرهای تصمیم و مقادیر مجاز برای آن‌ها را در حالت رویکرد استوار بیان می‌کند.

۲-۳- مدل برنامه‌ریزی خطی رویکرد استوار

با توجه به مدل‌های ارائه‌شده در بخش ۲-۱ و ۲-۲، مسئله از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته غیرخطی می‌باشد. لذا برای خطی کردن مدل، روابط زیر بین متغیرهای تصمیم‌گیری مطرح می‌گردد:

$$Q'_{jj'itnh} = A_{shit} X_{jj'itn}, \quad (112)$$

$$\forall (j, j') \in A_1, i, n, t, h \quad (113)$$

$$Y_{jtt'} = Y_{jt} Y_{j,t+1}, \quad \forall j \in G, t, t' \quad (114)$$

$$Y_{jtt''} = Y_{jt} Y_{j,t-1}, \quad \forall j \in G, t, t'' \quad (115)$$

$$Q'_{jj'itnh} \geq 0, \quad \forall (j, j') \in A_1, i, n, t, h \quad (116)$$

$$Y_{jtt'} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in G, t, t', t'' \quad (117)$$

$$+ \sum_{(j,j') \in A_2} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} \text{co2}_{jj'pn} X_{jj'ptn} \leq Z_2$$

$$\rho_{tc} G_{jj'in}^{tc} X_{jj'itn} \leq \eta_{jj'in}^{tc}, \quad (118)$$

$$\forall (j, j') \in A_1, i, n, t$$

$$\rho_{tc} G_{jj'in}^{tc} X_{jj'itn} \geq -\eta_{jj'in}^{tc}, \quad (119)$$

$$\forall (j, j') \in A_1, i, n, t$$

$$\rho_{tc} G_{jj'pn}^{tc} X_{jj'ptn} \leq \eta_{jj'pn}^{tc}, \quad (120)$$

$$\forall (j, j') \in A_2, p, n, t$$

$$\rho_{tc} G_{jj'pn}^{tc} X_{jj'ptn} \geq -\eta_{jj'pn}^{tc}, \quad (121)$$

$$\forall (j, j') \in A_2, p, n, t$$

$$\rho_{pr} G_{jhit}^{pr} A_{jhit} X_{jj'itn} \leq \eta_{jhit}^{pr}, \quad (122)$$

$$\forall (j, j') \in (S, M), i, h, n, t$$

$$\rho_{pr} G_{jhit}^{pr} A_{jhit} X_{jj'itn} \geq -\eta_{jhit}^{pr}, \quad (123)$$

$$\forall (j, j') \in (S, M), i, h, n, t$$

$$A_{jhit} V A_{jhit} \leq Q_{jit}, \quad \forall j \in S, h, i, t \quad (124)$$

$$\sum_{h \in H} A_{jhit} = Y_{jt}, \quad \forall j \in S, i, t \quad (125)$$

$$Q_{jit} = \sum_{j' \in M} \sum_{n \in N} X_{jj'itn}, \quad \forall j \in S, i, t \quad (126)$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{n \in N} X_{jj'itn} + \sum_{j \in U} \sum_{n \in N} X_{jj'itn} + VQ_{j'i,t-1}$$

$$- \sum_{j \in W} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{j'jptn} \delta_{ip} = VQ_{j'it}, \quad \forall j' \quad (127)$$

$$\sum_{j \in M} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + \sum_{j \in R} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + IQ_{j'p,t-1}$$

$$- \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{j'jptn} = IQ_{j'pt}, \quad \forall j' \in W, p, t \quad (128)$$

$$\sum_{j \in W} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + \sum_{j \in R} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in C} \sum_{n \in N} X_{j'jptn}, \quad (129)$$

$$\forall j' \in E, p, t$$

$$\overline{De}_{j'p,t} + \rho_{De} \rho_{j'pt}^{De} + sh_{j'p,t-1} - sh_{j'pt}^{pt}_{t < T}$$

$$= \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn}, \quad \forall j' \in C, p, t \quad (130)$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{n \in N} \bar{\alpha}_{j'pt} (1 - \rho_{\alpha}) X_{jj'p,t-1,n} \geq \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{j'jptn}, \quad (131)$$

$$\forall j' \in C, p, t$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{n \in N} \bar{\alpha}_{j'pt} (1 + \rho_{\alpha}) X_{jj'p,t-1,n} \leq \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{j'jptn}, \quad (132)$$

$$\forall j' \in C, p, t$$

$$\beta_{pt} \sum_{j \in C} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in R} \sum_{n \in N} X_{j'jptn}, \quad (133)$$

$$\forall j' \in E, p, t$$

$$(1 - \beta_{pt}) \sum_{j \in C} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in U} \sum_{n \in N} X_{j'jptn}, \quad (134)$$

$$\forall j' \in E, p, t$$

$$\gamma_{pt} \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in W} \sum_{n \in N} X_{j'jptn}, \quad (135)$$

$$\forall j' \in R, p, t$$

$$(1 - \gamma_{pt}) \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in W} \sum_{n \in N} X_{j'jptn}, \quad (136)$$

$$Q_{jit} = \sum_{j' \in M} \sum_{n \in N} X_{jj'itn}, \quad \forall j \in S, i, t \quad (133)$$

$$Y_{jtt'} - Y_{jt} - (1 - Y_{j,t+1}) \geq -\frac{3}{2}, \quad \forall j \in G, t', t \quad (134)$$

$$\frac{3}{2} Y_{jtt'} - Y_{jt} - (1 - Y_{j,t+1}) \leq 0, \quad \forall j \in G, t', t \quad (135)$$

$$Y_{jtt''} - Y_{jt} - (1 - Y_{j,t-1}) \geq -\frac{3}{2}, \quad \forall j \in G, t'', t \quad (136)$$

$$\frac{3}{2} Y_{jtt''} - Y_{jt} - (1 - Y_{j,t-1}) \leq 0, \quad \forall j \in G, t'', t \quad (137)$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{n \in N} X_{jj'itn} + \sum_{j \in U} \sum_{n \in N} X_{jj'itn} + VQ_{j'i,t-1} \quad (138)$$

$$- \sum_{j \in W} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{j'j'ptn} \delta_{ip} = VQ_{j'it}, \quad \forall j' \in M, i, t \quad (139)$$

$$\sum_{j \in M} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + \sum_{j \in R} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + IQ_{j'p,t-1} \quad (140)$$

$$- \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{j'j'ptn} = IQ_{j'pt}, \quad \forall j' \in W, p, t \quad (141)$$

$$\sum_{j \in W} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + \sum_{j \in R} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in C} \sum_{n \in N} X_{j'j'ptn}, \quad (142)$$

$$\forall j' \in E, p, t \quad (143)$$

$$\overline{De}_{j'p,t} + \rho_{De} \rho_{j'pt}^{De} + sh_{j'p,t-1} - sh_{j'pt}^{t < T} \quad (144)$$

$$= \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn}, \quad \forall j' \in C, p, t \quad (145)$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{n \in N} \bar{\alpha}_{j'pt} (1 - \rho_{\alpha}) X_{jj'p,t-1,n} \geq \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{j'j'ptn}, \quad (146)$$

$$\forall j' \in C, p, t \quad (147)$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{n \in N} \bar{\alpha}_{j'pt} (1 + \rho_{\alpha}) X_{jj'p,t-1,n} \leq \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{j'j'ptn}, \quad (148)$$

$$\forall j' \in C, p, t \quad (149)$$

$$\beta_{pt} \sum_{j \in C} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in R} \sum_{n \in N} X_{j'j'ptn}, \quad \forall j' \quad (150)$$

$$E, p, t \quad (151)$$

$$(1 - \beta_{pt}) \sum_{j \in C} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in U} \sum_{n \in N} X_{j'j'ptn}, \quad (152)$$

$$\forall j' \in E, p, t \quad (153)$$

$$\gamma_{pt} \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{j'j'ptn}, \quad (154)$$

$$\forall j' \in R, p, t \quad (155)$$

$$(1 - \gamma_{pt}) \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} = \sum_{j \in W} \sum_{n \in N} X_{j'j'ptn}, \quad (156)$$

$$\forall j' \in R, p, t \quad (157)$$

$$\theta_{it} \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{jj'ptn} \delta_{ip} = \sum_{j \in M} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{j'j'itn}, \quad (158)$$

$$\forall j' \in U, i, t \quad (159)$$

$$(1 - \theta_{it}) \sum_{j \in E} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{jj'ptn} \delta_{ip} = \sum_{j \in L} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} X_{j'j'itn}, \quad (160)$$

$$\forall j' \in U, i, t \quad (161)$$

$$\sum_{j \in M} \sum_{n \in N} X_{jj'itn} \leq cap_{ji} Y_{jt}, \quad \forall j \in S, i, t \quad (162)$$

$$VQ_{jit} \leq cap_{ji} Y_{jt}, \quad \forall j \in M, i, t \quad (163)$$

$$\sum_{j' \in W} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq cap_{jp} Y_{jt}, \quad \forall j \in M, p, t \quad (164)$$

$$Y_{jtt''} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in G, t, t', t'' \quad (117)$$

در نتیجه مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح آمیخته خطی به همراه معادلات لازم برای خطی کردن آن به صورت زیر می‌باشد.

$$\text{Min } Z_1 \quad (118)$$

$$\text{Min } Z_2 \quad (119)$$

S. t.

$$\sum_{j \in G} \sum_{t \in T} (f_{ijt} Y_{jt}) + \sum_{j \in G} \sum_{t \in T} \sum_{t'' \in T} op_{jt} Y_{jtt''} \quad (120)$$

$$+ \sum_{j \in G} \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T} cl_{jt} Y_{jtt'} \quad (121)$$

$$+ \sum_{(j,j') \in A_1} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (\bar{tc}_{jj'in} X_{jj'itn} + \eta_{jj'in}^{tc}) \quad (122)$$

$$+ \sum_{(j,j') \in A_2} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (\bar{tc}_{jj'pn} X_{jj'ptn} + \eta_{jj'pn}^{tc}) \quad (123)$$

$$+ \sum_{j \in S} \sum_{j' \in M} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} (\bar{pr}_{jh'it} Q'_{jj'itnh} + \eta_{jh'it}^{pr}) \quad (124)$$

$$+ \sum_{j \in M} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} h_{jit} VQ_{jit} + \sum_{j \in W} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h'_{jit} IQ_{jpt} \quad (125)$$

$$+ \sum_{j \in M} \sum_{j' \in W} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} C_{1jpt} X_{jj'ptn} \quad (126)$$

$$+ \sum_{j \in E} \sum_{j' \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (C_{2jpt} X_{jj'ptn} + C_{3jpt} X_{j'j'ptn}) \quad (127)$$

$$+ \sum_{j \in E} \sum_{j' \in R} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} C_{4j'pt} X_{jj'ptn} \quad (128)$$

$$+ \sum_{j \in E} \sum_{j' \in U} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} C_{5j'pt} X_{jj'ptn} \quad (129)$$

$$+ \sum_{j \in U} \sum_{j' \in L} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} C_{6j'it} X_{jj'itn} \quad (130)$$

$$+ \sum_{j \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \pi_{jpt} sh_{jpt} \leq z1 \quad (131)$$

$$\sum_{(j,j') \in A_1} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} co2_{jj'in} X_{jj'itn} \quad (132)$$

$$+ \sum_{(j,j') \in A_2} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} co2_{jj'pn} X_{jj'ptn} \leq z2 \quad (133)$$

$$\rho_{tc} G_{jj'in}^{tc} X_{jj'itn} \leq \eta_{jj'in}^{tc}, \quad \forall (j,j') \in A_1, i, n, t \quad (134)$$

$$\rho_{tc} G_{jj'in}^{tc} X_{jj'itn} \geq -\eta_{jj'in}^{tc}, \quad \forall (j,j') \in A_1, i, n, t \quad (135)$$

$$\rho_{tc} G_{jj'pn}^{tc} X_{jj'ptn} \leq \eta_{jj'pn}^{tc}, \quad \forall (j,j') \in A_2, p, n, t \quad (136)$$

$$\rho_{tc} G_{jj'pn}^{tc} X_{jj'ptn} \geq -\eta_{jj'pn}^{tc}, \quad \forall (j,j') \in A_2, p, n, t \quad (137)$$

$$\rho_{pr} G_{jh'it}^{pr} A_{jh'it} X_{jj'itn} \leq \eta_{jh'it}^{pr}, \quad \forall (j,j') \in (S,M), i, h, n, t \quad (138)$$

$$\rho_{pr} G_{jh'it}^{pr} A_{jh'it} X_{jj'itn} \geq -\eta_{jh'it}^{pr}, \quad \forall (j,j') \in (S,M), i, h, n, t \quad (139)$$

$$Q'_{jj'itnh} \leq X_{jj'itn}, \quad \forall (j,j') \in (S,M), i, h, n, t \quad (140)$$

$$Q'_{jj'itnh} \leq M A_{shit}, \quad \forall (j,j') \in (S,M), i, h, n, t \quad (141)$$

$$Q'_{jj'itnh} \geq X_{jj'itn} - M(1 - A_{shit}), \quad \forall (j,j') \in (S,M), i, h, n, t \quad (142)$$

$$A_{jh'it} V A_{jh'it} \leq Q_{jit}, \quad \forall j \in S, h, i, t \quad (143)$$

$$\sum_{h \in H} A_{jh'it} = Y_{jt}, \quad \forall j \in S, i, t \quad (144)$$

می‌کنند. به‌جز تکنیک‌های بهینه‌سازی چندهدفه که دسته‌های پارتو را به‌عنوان مجموعه‌ای از حل‌های بهینه فراهم می‌کنند، روش‌های گوناگونی در ادبیات وجود دارند تا مدل‌های برنامه‌ریزی چندهدفه را به یک مسئله تک هدفه تبدیل کرده و حل کنند. این روش‌ها بسته به زمان و نوع اطلاعاتی که از تصمیم‌گیرنده کسب می‌کنند به ۴ دسته تقسیم شده و در ادبیات به‌عنوان روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه شناخته شده هستند [۳۰].

اولین دسته از این روش‌ها، روش‌هایی هستند که بدون دریافت اطلاعات از تصمیم‌گیرنده عمل می‌کنند: این روش‌ها، شامل روش‌های بهینه‌سازی انفرادی^۱، روش تابع مطلوبیت^۲، معیار جامع^۳، ترابی-حسینی^۴ و حل ایده‌آل جابجا شده یا فیلترینگ^۵ هستند که در این مقاله بررسی شده‌اند.

۳-۱- روش بهینه‌سازی انفرادی

در این روش جواب بهینه هر مسئله تک هدفه برای مسئله چندهدفه یک جواب کاراست. به عبارت دیگر مدل برنامه‌ریزی هر بار توسط یکی از اهداف حل می‌شود، اگر همه حل‌های مؤثر برحسب همه محدودیت‌ها برابر باشند یک حل ایده‌آل کسب شده است. لذا مقادیر f_g^* به دست آمده در دیگر روش‌های تصمیم‌گیری به کار می‌رود.

۳-۲- روش معیار جامع

با این روش مسئله به یک مدل برنامه‌ریزی تبدیل می‌شود که هدف آن این است تا به‌طور هم‌زمان فاصله (D) توابع هدف از حل ایده‌آل آن‌ها که از روش بهینه‌سازی انفرادی کسب شده‌اند را مطابق رابطه زیر حداقل نماید.

$$\min D = \left(\sum_{g=1}^D \left(\frac{f_g^* - f_g}{f_g^*} \right)^r \right)^{1/r} \quad (167)$$

۳-۳- روش مجموع وزنی

تابع مطلوبیت برای هر f_g تعریف می‌شود که مقادیر بین ۰ تا ۱ به آن اختصاص می‌یابد. همان‌طور که مطلوبیت افزایش می‌یابد، مقدار مطلوبیت به یک نزدیک‌تر می‌شود. تابع مطلوبیت برای f_g به صورت زیر تعریف می‌شود. در این روش بهینه‌سازی بایستی مجموع اوزان توابع هدف برابر ۱ باشد.

$$\text{Max } U(f_1, f_2, \dots, f_p) = \sum_{g=1}^p w_g(d_g(f_g)) \quad (168)$$

$$d_p(f_1, f_2, \dots, f_p) = \begin{cases} 0 & f_g < L_g \\ \frac{f_g - L_g}{U_g - L_g} & L_g < f_g < U_g \\ 1 & f_g > U_g \end{cases} \quad (169)$$

که در آن L_g بهترین مقدار تابع هدف و U_g بدترین مقدار تابع هدف

$$IQ_{jpt} \leq cap_{jp} Y_{jt}, \quad \forall j \in W, p, t \quad (153)$$

$$\sum_{j \in W} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} + \sum_{j \in R} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq cap_{j'p} Y_{j't}, \quad (154)$$

$$\forall j' \in E, p, t, \sum_{j \in C} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq cap_{j'p} Y_{j't}, \quad \forall j' \in E, p, t \quad (155)$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq cap_{j'p} Y_{j't}, \quad \forall j' \in U, p, t \quad (156)$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{n \in N} X_{jj'ptn} \leq cap_{j'p} Y_{j't}, \quad \forall j' \in R, p, t \quad (157)$$

$$\sum_{j \in U} \sum_{n \in N} X_{jj'itn} \leq cap_{j'i} Y_{j'i}, \quad \forall j' \in L, i, t \quad (158)$$

$$Y_{j,t-1} = 0, \quad \forall j \in G, t = 1 \quad (159)$$

$$Y_{j,t+1} = 0, \quad \forall j \in G, t = T \quad (160)$$

$$X_{jj'itn}, VQ_{mit}, Q_{sit}, \eta_{jj'in}^{tc}, \eta_{jhit}^{pr} \geq 0, \quad (161)$$

$$\forall (j, j') A_{1,i,n,t,s,m,h}, X_{jj'ptn}, IQ_{wpt}, sh_{cpt}, \eta_{jj'pn}^{tc} \geq 0, \quad (162)$$

$$\forall (j, j') A_{2,p,n,t,w,c}, Y_{jt} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in G, t \quad (163)$$

۳- روش حل

مسائل بهینه‌سازی از نظر تعداد توابع هدف و معیارهای بهینه‌سازی، به دو نوع تقسیم‌پذیر هستند: مسائل بهینه‌سازی تک هدفه و مسائل بهینه‌سازی چندهدفه. در مسائل بهینه‌سازی تک هدفه، هدف از حل مسئله بهبود یک شاخص عملکرد یگانه است که مقدار کمینه یا بیشینه آن کیفیت پاسخ به دست آمده را به‌طور کامل منعکس می‌کند؛ اما در برخی موارد، نمی‌توان صرفاً با اتکا به یک شاخص، یک پاسخ فرضی برای مسئله بهینه‌سازی را امتیازدهی نمود. در این نوع مسائل ناگزیر به تعریف چندین تابع هدف یا شاخص عملکرد می‌باشد که به‌طور هم‌زمان مقدار همه آن‌ها را بهینه شود.

ابتدا شکل کلی یک مدل ریاضی با P تابع هدف و q متغیر را به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$\text{Max}[f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)]' \quad (164)$$

$$S.t.$$

$$g_l(x) \leq b_l, \quad \forall l = 1, 2, \dots, m \quad (165)$$

$$X_h \geq 0, \quad \forall h = 1, 2, \dots, q \quad (166)$$

که در آن $X = [x_1, x_2, \dots, x_h]'$ بردار متغیرها، l و h به ترتیب شاخص محدودیت‌ها و متغیرها می‌باشند.

یک حل ایده‌آل برای مسئله مدل شده در (۱۶۴) حلی است که همه اهداف را به‌طور هم‌زمان بهینه کند درحالی که همه محدودیت‌ها برآورده شوند. به‌رحال بسیاری از مسائل در صورتی که به شکل واقعی مدل‌سازی شوند دارای چند هدف بوده که بعضاً با یکدیگر در تناقض و تضاد نیز هستند. منظور از تضاد این است که پاسخی که منجر به بهبود یکی از اهداف می‌شوند اهداف دیگر را بهبود نمی‌دهند. از این رو تصمیم‌گیرنده‌ها یک روش حل مؤثر و قابل ترجیح را جستجو

1. Individual Optimization
2. Sum Weight Method
3. LP-Metrics
4. Torabi-Hassini
5. Displaced Ideal Solution

تعریف می‌شود.

در برخورد با مدل زنجیره تأمین پیشنهادی، انتخاب‌شده‌اند.

۳-۴- روش ترابی-حسینی

این روش توسط [۳۱] ارائه شده است که یک روش جدید برای حل مسائل چندهدفه می‌باشد. برای استفاده از این روش، علاوه بر کسب بهترین مقدار هر تابع هدف از روش بهینه‌سازی انفرادی، نیاز به بدترین مقدار هر تابع هدف نیز می‌باشد. هدف این روش کمینه کردن فاصله بین توابع هدف از مقدار ایده آلشان است. گام‌های زیر نشان‌دهنده روش ذکر شده می‌باشد:

گام ۱- به دست آوردن بهترین و بدترین مقدار هر تابع هدف

$$w_1^{NIS} = w_1(x_2^{PIS}), w_2^{NIS} = w_2(x_1^{PIS}) \quad (170)$$

گام ۲- تعیین یک تابع عضویت خطی برای هر تابع هدف

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } w_1 < w_1^{PIS} \\ \frac{w_1 - w_1^{PIS}}{w_1^{NIS} - w_1^{PIS}} & \text{if } w_1^{PIS} \leq w_1 \leq w_1^{NIS} \\ 0 & \text{if } w_1 > w_1^{NIS} \end{cases} \quad (171)$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } w_2 < w_2^{PIS} \\ \frac{w_2 - w_2^{PIS}}{w_2^{NIS} - w_2^{PIS}} & \text{if } w_2^{PIS} \leq w_2 \leq w_2^{NIS} \\ 0 & \text{if } w_2 > w_2^{NIS} \end{cases} \quad (172)$$

که μ نشان‌دهنده درجه اثربخشی p امین تابع هدف است.

گام ۳- استفاده از رابطه زیر برای یکپارچه کردن توابع هدف

$$\text{Min } \vartheta(x) = \varphi \vartheta_0 + (1 - \varphi) \sum_{g=1}^P w_g \mu_g(x) \quad (173)$$

S. t.

$$\vartheta_0 \leq \mu_g(x), \quad \forall g = 1, 2 \quad (174)$$

$$x \in F(x), \vartheta_0 \text{ and } \vartheta \in \{0, 1\} \quad (175)$$

که φ برابر با ضریب جبران توابع هدف می‌باشد و مجموع اوزان توابع هدف نیز بایستی برابر یک گردد.

۳-۵- روش حل ایده آل جابجا شونده (فیلترینگ)

این روش برای مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه و انتخاب یک روش از بین آن‌ها طراحی شده است. در این روش شاخص‌های مورد مقایسه روش‌ها در سطرهای یک جدول نوشته می‌شوند و بهترین مقدار هر سطر به‌عنوان نماینده انتخاب می‌شود و بعد از نرمالایز کردن جدول، کمترین مقدار مجموع قدر مطلق هر روش به‌عنوان بهترین روش انتخاب می‌شود.

برای نرمالایز کردن از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$(F_g^* - F_g) / F_g^* \quad (176)$$

که در رابطه فوق F_g^* بهترین مقدار هر سطر می‌باشد.

لازم به ذکر است برای حل مسائل چندهدفه کمینه‌سازی با روش‌های ذکر شده، بایستی قبل توابع هدف کمینه‌سازی به توابع هدف بیشینه‌سازی تبدیل گردد.

روش‌های معرفی شده، روش‌های معمول و کاربردی در حل مسائل چندهدفه می‌باشند که در این مقاله برای تأثیر و عملکردشان

۴- نتایج محاسباتی

در این بخش نتایج محاسباتی به‌منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی در حالت رویکرد قطعی و میزان کارایی روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه ارائه می‌شود. از آنجایی که مثال‌های استاندارد در این زمینه وجود ندارد، از مثال‌هایی با داده‌های تصادفی استفاده شده است. لذا، ده مسئله در ۵ سایز با ترکیبات مختلف مسئله از طریق نرم‌افزار MATLAB و برحسب توزیع یکنواخت به‌طور تصادفی ایجاد شده‌اند. ابعاد مسائل طراحی شده به همراه جدول پارامترهای موردنیاز به ترتیب در جدول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

جدول (۱): مسائل نمونه طراحی شده در ابعاد مختلف

	اندازه مسئله				
	۱	۲	۳	۴	۵
مشتری	۴	۷	۱۰	۱۳	۱۶
مراکز توزیع	۲	۳	۴	۵	۶
مراکز تولیدی	۲	۲	۳	۴	۵
انبار بالقوه	۲	۲	۳	۳	۴
مراکز تعمیر	۱	۱	۲	۲	۳
مراکز جمع‌آوری	۲	۳	۴	۵	۶
تأمین‌کننده	۲	۳	۴	۵	۵
مراکز انهدام	۱	۱	۲	۲	۲
مراکز بازیافت	۱	۱	۲	۲	۳

کلیه مسائل طراحی شده در این بخش به همراه ۳ نوع محصول، ۳ نوع ماده خام، ۳ بازه تخفیف و در ۴ دوره زمانی حل شده است. مطابق با آنچه در بخش ۳ ذکر شد، در روش مجموع وزنی، وزن‌های اهداف یکسان در نظر گرفته شده است. در روش مجموع وزنی $r = 1$ ، نرم خطی و در روش ترابی حسینی $\varphi = 0.8$ اعمال شده است. مقادیر f_1^* و f_2^* با استفاده از روش بهینه‌سازی انفرادی و از جدول بهینه‌سازی^۱ کسب شده است. مدل با کاربرد سه روش تصمیم‌گیری معیار جامع، مجموع وزنی و ترابی حسینی به‌طور جداگانه برای هر یک از مسائل نمونه در ابعاد ذکر شده در رویکرد قطعی با نرم‌افزار GAMS حل شده است و مقادیر تابع هدف اول Z_1 تابع هدف دوم Z_2 و زمان محاسباتی کسب شده است. جدول (۳) نتایج تابع هدف اول و دوم و زمان را برای مسئله نمونه در سایز ۱ در حالت رویکرد قطعی و جدول (۴) نیز میانگین تابع هدف اول و دوم و زمان را در مسائل نمونه برای کلیه ابعاد مشخص شده در حالت رویکرد قطعی نشان می‌دهد.

مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از جدول (۳) مشاهده می‌شود، در رویکرد قطعی، بهترین مقدار تابع هدف اول و زمان حل مسئله مربوط به روش مجموع وزنی و بهترین مقدار تابع هدف دوم مربوط

به تابع هدف دوم در روش ترابی- حسینی به‌دست‌آمده است.

جدول (۲): حدود داده‌های اسمی تولیدشده

Fi_{st}	$\sim(4000, 4500)$	VA_{shit}	$\sim(4000, 10000)$
Fi_{mt}	$\sim(5000, 6000)$	C_{2ept}	$\sim(0, 5, 1/5)$
Fi_{wt}	$\sim(5000, 6000)$	C_{Arpt}	$\sim(0, 5, 1/5)$
Fi_{et}	$\sim(5000, 6000)$	C_{6lit}	$\sim(0, 5, 1)$
Fi_{rt}	$\sim(5000, 6000)$	De_{cpt}	$\sim(200, 300)$
Fi_{ut}	$\sim(5000, 6000)$	α_{cpt}	$\sim(0, 1, 0, 2)$
Fi_{lt}	$\sim(5000, 6000)$	γ_{pt}	$\sim(0, 4, 0, 5)$
cl_{st}	$\sim(4000000, 6000000)$	$TC_{jj'in}$	$\sim(2, 5, 4)$
cl_{mt}	$\sim(3500000, 6000000)$	$TC_{jj'pn}$	$\sim(5, 15)$
cl_{wt}	$\sim(4000000, 7000000)$	$Co_{2jj'in}$	$\sim(2, 5, 4)$
cl_{et}	$\sim(6000000, 9000000)$	$Co_{2jj'pn}$	$\sim(5, 15)$
cl_{rt}	$\sim(1500000, 4000000)$	h_{mit}	$\sim(0, 2, 0, 5)$
cl_{ut}	$\sim(3500000, 4000000)$	h'_{wpt}	$\sim(0, 8, 1, 2)$
cl_{lt}	$\sim(3000000, 6000000)$	Pr_{shit}	$\sim(1, 1, 5)$
op_{st}	$\sim(2500000, 5000000)$	C_{1mpt}	$\sim(0, 5, 1, 5)$
op_{mt}	$\sim(2500000, 3500000)$	C_{3ept}	$\sim(0, 5, 1, 5)$
op_{wt}	$\sim(4000000, 6000000)$	C_{5upt}	$\sim(0, 5, 1, 5)$
op_{et}	$\sim(5000000, 8000000)$	π_{cpt}	$\sim(150, 200)$
op_{rt}	$\sim(1000000, 3000000)$	δ_{ip}	$\sim(1, 3)$
op_{ut}	$\sim(1000000, 3000000)$	β_{pt}	$\sim(0, 4, 0, 5)$
op_{lt}	$\sim(2000000, 4000000)$	θ_{it}	$\sim(0, 2, 0, 3)$
cap_{si}	$\sim(12000, 15000)$	cap_{mi}	$\sim(4000, 6000)$
cap_{mp}	$\sim(1600, 2200)$	cap_p	$\sim(2000, 2500)$
cap_{ep}	$\sim(1300, 1500)$	cap'_{ep}	$\sim(200, 300)$
cap_{rp}	$\sim(200, 250)$	cap_{up}	$\sim(200, 250)$
cap_{lp}	$\sim(1000, 1600)$		

جدول (۳): نتایج محاسباتی برای مسئله نمونه در سایز ۱

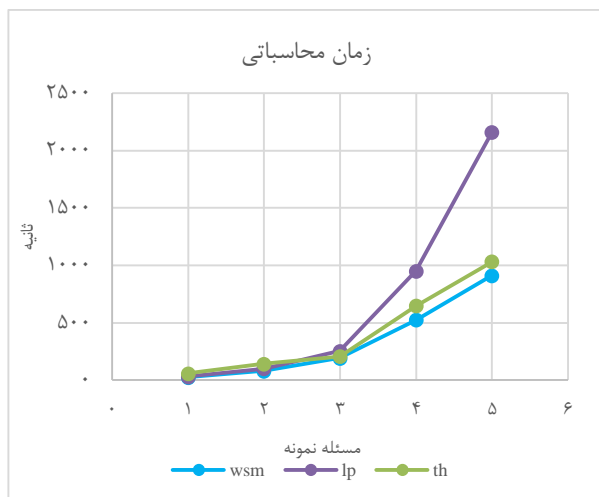
روش حل	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	زمان حل
مجموع وزنی	۱۰۱۲۵۴۹۹/۱۲	۴۸۲۰۰۹/۴۵	۲۵/۷۹
معیار جامع	۱۰۳۰۶۷۲۳/۸۵	۴۲۰۴۲۸/۹۳	۳۰/۸۳
ترابی-حسینی	۱۰۹۱۵۳۹۰/۴۶	۴۱۱۷۱۶/۰۳	۵۸/۷۲

جدول (۴): میانگین توابع هدف و زمان حل کلیه ابعاد مسئله

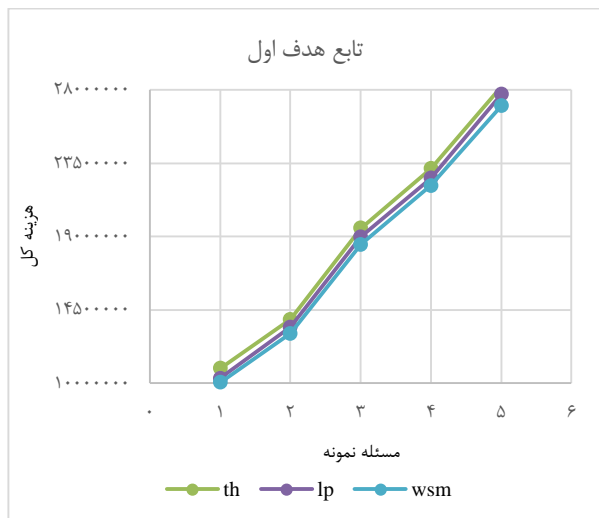
زمان حل	تابع هدف دوم	تابع هدف اول	روش حل
۳۴۷/۴۶	۳۸۹۱۷۶۳/۷	۶۳۹۸۲۵۵۱/۸۰	مجموع وزنی
۱۳۳۷/۰	۳۴۳۹۵۳۲/۳	۶۵۳۲۰۴۲۶/۳۴	معیار جامع
۱۰۵۶/۲	۳۳۹۴۸۲۸/۶	۶۷۵۳۰۳۹۱/۲۸	ترابی-حسینی

شکل (۲) میانگین زمان محاسباتی را برای ده داده اسمی تولید

شده در هر مسئله نمونه در حالت قطعی را نشان می‌دهد. مطابق با شکل با افزایش سایز مسئله زمان حل مسئله نیز به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. در شکل (۳) و (۴) نیز به ترتیب میانگین توابع هدف اول و دوم برای ده داده اسمی تولیدشده برای هر مسئله نمونه در رویکرد قطعی نشان داده‌شده است. در این اشکال با افزایش سایز مسئله هزینه کل شبکه زنجیره تأمین و میزان کل انتشار گاز CO_2 افزایش می‌یابد و میزان اختلاف و افزایش مقادیر روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه را نسبت به هم نیز نشان می‌دهد.



شکل (۲): میانگین زمان حل برای هر مسئله نمونه (قطعی)

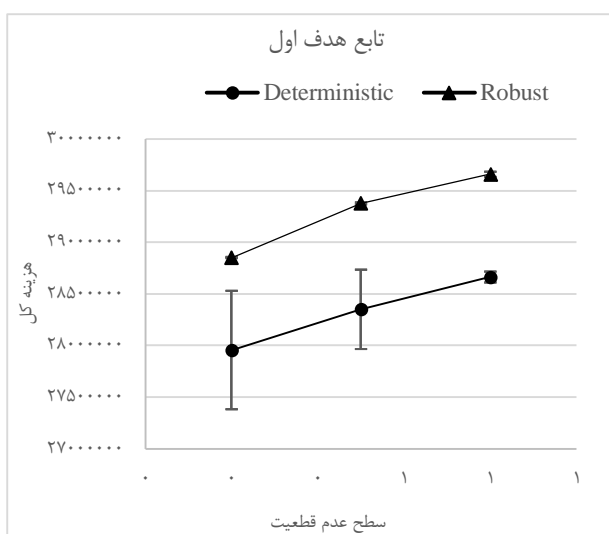


شکل (۳): میانگین تابع هدف اول برای هر مسئله نمونه (قطعی)

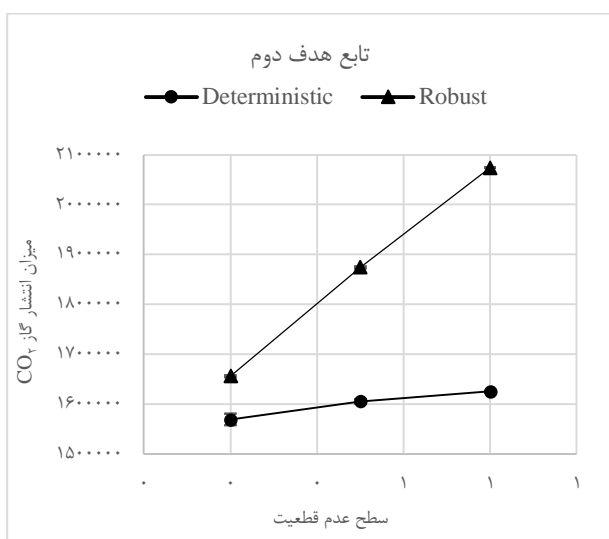
مطابق با شکل (۲) تا (۴) مشاهده می‌شود، روش مجموع وزنی میزان زمان محاسباتی کمتری را نشان می‌دهد. درحالی‌که روش ترابی-حسینی مقدار تابع هدف دوم بهتری را نسبت به روش مجموع وزنی نشان می‌دهد. با توجه به افزایش نمایی زمان محاسباتی در شکل (۲) می‌توان نتیجه گرفت که در سایز بالاتر روش معیار جامع در رویکرد قطعی کارایی بهتری نخواهد داشت.

برای مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه ارائه‌شده در رویکرد قطعی از روش فیلترینگ با در نظر گرفتن ۳ شاخص، تابع هدف اول، تابع هدف دوم و زمان محاسباتی استفاده‌شده است. این

مشاهده می‌شود با افزایش سطح عدم قطعیت، هزینه‌های لجستیکی و میزان انتشار گاز CO_2 بنا به قطعی نبودن پارامترهای مسئله افزایش یافته است. این در حالی است که انحراف معیار حاصل از داده‌های واقعی برای هر کدام از مسائل نمونه در رویکرد استوار کاهش یافته است. برای جزئیات بیشتر، نتایج به دست آمده از رویکرد استوار برای روش تصمیم‌گیری ترابی-حسینی در شکل (۵) و (۶) نشان داده شده است. داده‌های مربوط به این اشکال مربوط به سائز ۵ مسائل نمونه طراحی شده می‌باشد. مطابق با شکل مشاهده می‌شود، میانگین توابع هدف در رویکرد استوار نسبت به رویکرد قطعی بیشتر می‌باشد، در حالی که انحراف معیار داده‌های واقعی در رویکرد استوار نسبت به رویکرد قطعی در هر سطح عدم قطعیت کمتر می‌باشد.



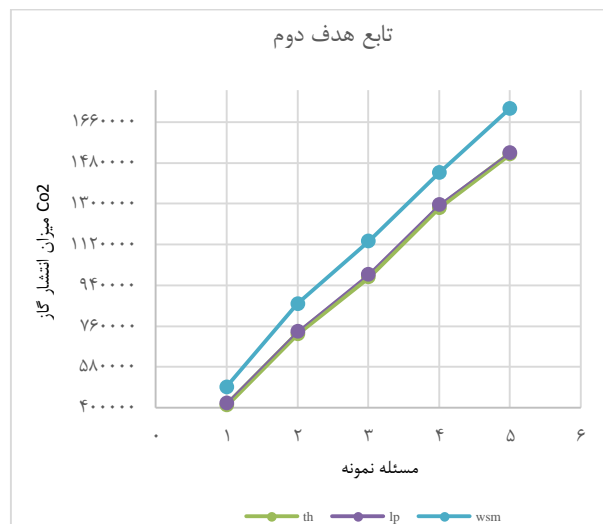
شکل (۵): مقایسه تابع هدف اول در دو رویکرد قطعی و استوار با روش ترابی-حسینی



شکل (۶): مقایسه تابع هدف دوم در دو رویکرد قطعی و استوار با روش ترابی-حسینی

در نهایت برای مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه برای رویکرد قطعی از روش فیلترینگ استفاده شده است. شاخص‌های مورد

مقادیر میانگین تمامی مسائل نمونه برای هر روش به دست آمده است. در جدول (۵) مقایسه نهایی روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه انجام گرفته است. طبق نتایج به دست آمده از این جدول روش مجموع وزنی بهترین روش به دست آمده با توجه به معیارهای برگزیده، در میان سایر روش‌ها می‌باشد.



شکل (۴): میانگین تابع هدف دوم برای هر مسئله نمونه (قطعی)

برای تعیین عملکرد مدل پیشنهادی در رویکرد استوار، ابتدا برای تمامی مسائل نمونه طراحی شده ۳ داده واقعی برای پارامترهای غیرقطعی، شامل هزینه‌های حمل و نقل مواد خام و محصولات، قیمت خرید مواد خام، تقاضای مشتری و نرخ برگشت محصولات مصرف شده، در بازه $[nominal\ value - \rho.G^*, nominal\ value + \rho.G^*]$ برای هر سائز نمونه ایجاد شده است. داده‌های واقعی در سطوح قطعیت برای رویکرد قطعی و غیرقطعی ایجاد می‌شود و از حل هر داده میانگین و انحراف معیار هر سطح عدم قطعیت محاسبه می‌شود. در این روش مکان تسهیلات انتخاب شده بایستی ثابت در نظر گرفته شده و مسئله به ازای تخصیص در دو رویکرد قطعی و غیرقطعی حل شود. خلاصه‌ای از نتایج محاسباتی صورت گرفته برای رویکرد استوار با روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول (۵): مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری در رویکرد قطعی

روش حل	مجموع وزنی	معیار جامع	ترابی-حسینی
معیار سنجش		$(F_j^* - F_j)/F_j^*$	
مقدار تابع هدف اول	۰/۰۰	-۰/۰۲۱	-۰/۰۵۵
مقدار تابع هدف دوم	-۰/۱۴	-۰/۰۱۳	۰/۰۰
زمان حل	۰/۰۰	-۲/۸۴	-۲/۰۳
فاصله پلکانی	۰/۱۴	۲/۸۸	۲/۰۹
فاصله مستقیم	۰/۱۴	۲/۸۴	۲/۰۴

در این جدول نتایج محاسباتی در ۳ سطح عدم قطعیت $\rho = 0.2, 0.5, 0.8$ صورت گرفته است. مطابق با نتایج به دست آمده

موردتوجه قرارگرفته است. جدول (۷) نتایج محاسباتی مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه را نشان می‌دهد. در این رویکرد ترابی-حسینی نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌ها کسب کرده است.

مقایسه باری این حالت شامل توابع هدف در رویکرد قطعی و استوار، انحراف معیار توابع هدف در حالت قطعی و استوار و زمان محاسباتی مسئله می‌باشد. در این روش برای مقایسه ساده‌تر میانگین توابع هدف و انحراف معیارهای مسائل نمونه به‌عنوان معیار مقایسه

جدول (۶): نتایج محاسباتی میانگین توابع هدف در رویکرد استوار

مسئله	روش حل	ρ	تابع هدف ۱ (قطعی)	تابع هدف ۲ (قطعی)	تابع هدف ۱ (استوار)	تابع هدف ۲ (استوار)	انحراف معیار تابع هدف ۱ (قطعی)	انحراف معیار تابع هدف ۲ (قطعی)	انحراف معیار تابع هدف ۱ (استوار)	انحراف معیار تابع هدف ۲ (استوار)
۱	مجموع وزنی	۰/۲	۱۰۰۱۱۲۶۹/۸۶	۴۹۵۱۴۹/۴۶	۱۱۱۴۵۴۳۲/۷۷	۵۸۵۵۱۳/۰۳	۱۰۰۱۹۷۷/۴۵	۱۷۳۲۴/۲۲	۲۵۹۰۸/۲۳	۳۲۱۶/۵۴
		۰/۵	۱۰۰۶۲۸۱۲/۱۷	۵۳۸۱۶۶/۶۱	۱۱۶۴۸۳۱۱/۱۰	۸۱۳۸۹۴/۲۲	۱۱۶۲۱۶/۵۴	۲۲۴۸۶/۵۱	۲۳۵۹۸/۴۵	۱۹۸۷/۳۷۶
		۰/۸	۱۰۰۸۹۸۶۳۲/۱۶	۶۲۲۰۱۶/۲۳	۱۱۹۰۰۱۴۵/۷۱	۱۰۲۷۳۳۳/۱۶	۱۲۵۶۳۰/۳۷	۲۱۷۹۰/۳۹	۱۵۷۹۲/۷۶	۲۵۰۹/۱۵
	معیار جامع	۰/۲	۱۰۰۳۹۴۷۸۵/۹۶	۴۲۷۲۹۷/۰۵	۱۱۳۳۵۰۱۷/۲۹	۵۲۳۰۲۲/۸۶	۱۰۵۷۰۷/۵۱	۱۱۴۰۲/۲۵	۱۲۹۴۷/۶۳	۱۲۹۳/۲۲
		۰/۵	۱۰۰۸۱۷۰۷۶/۷۴	۴۷۰۹۴۵/۷۶	۱۱۸۳۴۸۷۰/۶۱	۷۴۳۰۳۴/۵۷	۹۵۹۸۵/۵۰	۱۳۵۶۷/۲۹	۱۳۵۶۷/۲۷	۱۲۱۸/۹۸
		۰/۸	۱۱۱۶۹۸۷۷/۳۵	۵۰۶۲۱۲/۲۵	۱۲۱۳۵۶۸۵/۵۳	۹۴۲۸۸۵/۱۰	۱۲۵۲۴۶/۸۷	۱۰۲۹۵/۱۲	۱۳۵۵۸/۵۹	۱۱۹۹/۲۱
	ترابی-حسینی	۰/۲	۱۱۰۱۱۵۲۰/۰۲	۴۱۷۸۷۳/۰۰	۱۱۹۳۹۵۸۴/۹۱	۵۱۴۵۴۴/۹۵	۱۲۸۹۶۷/۵۴	۱۵۲۹۹/۰۴	۱۰۳۹۹/۵۲	۱۳۳۳۰/۵۰
		۰/۵	۱۱۴۲۳۰۲۳/۶۱	۴۵۷۰۱۶/۰۷	۱۲۴۴۶۰۴/۵۳	۷۳۴۲۱۹/۷۳	۱۱۸۴۷۴/۵۶	۱۹۵۳۵/۲۵	۱۱۰۸۵/۲۵	۱۱۱۰/۳۰
		۰/۸	۱۱۶۹۷۷۷۰/۱۵	۴۹۷۴۶۰/۵۶	۱۲۷۴۴۳۸۹/۴۸	۹۳۴۱۵۶/۴۶	۱۲۵۰۸۰/۵۷	۱۱۸۶۷/۸۹	۱۱۳۴۷/۷۷	۱۳۷۵/۲۴
۲	مجموع وزنی	۰/۲	۱۳۹۵۹۸۷۴/۴۵	۸۱۹۸۵۷/۵۷	۱۴۶۵۰۰۲۹/۱۴	۸۹۷۴۵۳/۴۶	۱۶۴۲۵۴/۵۶	۱۰۶۵۴/۷۶	۳۶۵۴۲/۶۴	۲۶۴۵/۲۴
		۰/۵	۱۴۰۸۳۲۳۳/۵۴	۹۵۶۴۶۳/۰۴	۱۴۷۹۴۳۱۹/۵۷	۱۲۳۳۴۴۱/۷۴	۱۱۴۸۲۸/۱۴	۱۲۳۳۰/۷۷	۲۶۸۷۷/۴۷	۳۶۴۲/۱۷
		۰/۸	۱۴۲۹۸۷۳۳/۲۰	۹۹۳۱۴۸/۹۶	۱۴۸۹۴۴۳۰/۲۵	۱۳۴۲۹۸۴/۵۵	۱۰۵۴۰۹/۹۸	۲۸۲۰۳/۳۴	۱۲۳۴۶/۱۰	۱۶۵۲/۳۹
	معیار جامع	۰/۲	۱۳۵۵۸۶۲۰/۴۲	۷۴۵۰۹۵/۲۴	۱۴۴۷۴۸۱۶/۹	۸۳۸۹۶۷/۶۵	۱۰۵۵۵۰/۳۸	۷۳۲۳/۵۰	۹۵۳۳/۱۶	۱۲۳۰/۷۳
		۰/۵	۱۳۹۴۴۰۰۷/۳۵	۷۸۷۰۱۵/۰۰	۱۴۹۳۳۶۶۵/۰۵	۱۰۶۰۱۵۲/۴۵	۹۲۳۳۵/۹۷	۷۸۹۴/۷۵	۱۰۳۶۰/۸۸	۱۱۰۶/۷۰
		۰/۸	۱۴۲۶۷۰۶۱/۲۲	۸۲۳۷۷۰/۶۴	۱۵۲۷۴۴۲/۱۶	۱۲۵۹۷۳۵/۵۲	۱۵۷۵۴۵/۶۲	۶۸۸۶/۳۶	۱۱۶۳۲/۹۵	۹۶۸/۷۹
	ترابی-حسینی	۰/۲	۱۴۰۵۲۸۸۹/۹۶	۷۳۷۵۵۸/۰	۱۴۹۴۱۶۲۹/۱۸	۸۲۸۳۹۳/۸۷	۹۴۹۹۰/۸۹	۸۵۱/۹۲	۱۳۳۷۷/۸۹	۱۰۱۱/۴۱
		۰/۵	۱۴۴۲۰۵۴۰/۳۸	۷۷۵۱۸۸/۰۵	۱۵۴۲۶۶۷/۶۳	۱۰۴۸۲۰۳/۳۰	۱۱۰۳۸۳/۷۷	۸۳۹۷/۵۸	۱۱۰۴۴/۵۳	۱۱۱۶/۲۴
		۰/۸	۱۴۷۷۸۸۱۷/۱۵	۸۱۰۵۵/۲۹	۱۵۷۴۳۳۹۴/۰۳	۱۲۴۱۹۹۶/۲۱	۹۷۵۸۴/۱۰	۵۵۴۷/۸۹	۱۰۰۸۲/۴۰	۱۱۰۹/۸۰
۳	مجموع وزنی	۰/۲	۱۷۹۲۵۸۴۱/۱۴	۱۱۶۴۸۹۲/۶	۱۹۹۵۶۴۴/۳	۱۲۲۹۸۷۳/۹۰	۱۶۸۴۸۹/۳۰	۱۰۲۴۲/۲۵	۲۱۸۹۶/۳۹	۲۶۸۷/۲۴
		۰/۵	۱۸۴۵۸۱۷۲/۲۱	۱۱۸۶۴۲۳/۵	۲۰۲۵۴۴۳۱۹/۴۶	۱۵۴۶۰۰۰/۴۲	۱۳۹۸۲۷/۷۱	۱۸۶۵۴/۴۶	۲۷۹۳۲/۳۳	۳۹۸۲/۲۵
		۰/۸	۱۹۷۱۸۷۱۸/۳۳	۱۲۶۷۹۴/۱۴	۲۰۴۶۶۵۴۵/۰۵	۱۶۱۳۶۶۶/۹۵	۱۳۰۴۵۲/۱۲	۲۳۶۹۱/۴۰	۲۳۸۹۲/۲۴	۱۳۲۴/۹۸
	معیار جامع	۰/۲	۱۹۰۲۴۸۱۷/۴۳	۹۹۷۵۷۶/۱۲	۲۰۰۰۳۴۵۳/۰۵	۱۳۰۹۳۰۰/۳۹	۹۴۲۵۵/۷۱	۱۰۵۷۷/۷۵	۱۰۸۳۷/۰۱	۱۰۲۳/۱۴
		۰/۵	۱۹۵۰۰۳۲/۱۵	۱۰۳۷۲۱۵/۳	۲۰۵۰۱۶۸۵/۲۳	۱۵۰۹۰۶۶/۸۹	۱۲۷۱۶۵/۷۵	۸۲۶۸/۲۸	۱۱۵۳۲/۶۸	۱۰۷۷/۹۶
		۰/۸	۱۹۸۱۳۲۸۴/۰۵	۱۰۷۴۲۹۰/۷	۲۰۸۰۱۷۱/۱۸۵	۱۰۷۸۱۴۴/۳۳	۱۵۱۱۸۰/۶۴	۶۰۸۴/۸۸	۱۰۴۰۸/۴۰	۱۰۲۲/۴۳
	ترابی-حسینی	۰/۲	۱۹۶۰۲۴۷۲/۰۰	۹۸۶۷۶۲/۶۰	۲۰۵۳۹۳۷/۹۸	۱۲۹۸۶۳۶/۲۴	۱۲۰۶۵۶/۸۹	۱۰۲۳۴/۷۳	۱۲۹۷۲/۶۱	۱۰۱۶/۲۸
		۰/۵	۲۰۰۴۲۳۱۳/۰۳	۱۰۲۸۰۸۳/۷	۲۱۰۲۸۵۲/۵۰	۱۴۹۷۸۷۵/۵۵	۱۰۳۲۷۴/۰۲	۶۹۰۶/۶۰	۱۱۳۳۱/۵۳	۹۷۳/۱۲
		۰/۸	۲۰۳۹۹۹۹۶/۷۰	۱۰۵۹۶۹۵/۷	۲۱۳۴۲۱۵۶/۳۶	۱۵۴۴۰۶۹/۹۳	۱۰۹۱۳۹/۷۸	۵۱۵۱/۷۵	۷۶۳۹/۰۳	۹۵۷/۱۴
۴	مجموع وزنی	۰/۲	۲۲۳۰۸۵۹۲/۵۷	۱۴۵۲۲۷۹/۰	۲۳۱۹۲۶۲۸/۷	۱۷۶۳۴۱۴/۱۵	۱۵۳۷۳۰/۴۰	۱۳۷۰۱/۰۱	۴۰۰۴۳/۸۹	۳۶۰۴/۰۱
		۰/۵	۲۲۶۸۹۰۸۲/۹۷	۱۴۸۷۷۰۰/۰	۲۳۷۰۳۹۹۲/۷۹	۱۹۳۳۸۶۵/۹۱	۱۵۲۲۲۶/۹۸	۱۹۶۶۷/۷۶	۳۸۳۳۸/۴۴	۳۴۴۴/۷۳
		۰/۸	۲۳۰۹۵۰۲۰/۱۸	۱۵۵۵۲۴۳/۱	۲۴۰۰۵۸۳۸/۴۶	۱۳۹۸۰۴۴/۸۱	۱۴۴۷۸۹/۱۲	۱۷۹۳۵/۱۹	۳۲۶۱۶/۲۵	۲۶۰۵/۸۶
	معیار جامع	۰/۲	۲۳۱۲۶۸۲۶/۱۴	۱۲۹۴۲۸۱/۴	۲۳۵۹۸۷۱/۲۷	۱۶۲۸۹۴۹/۰۴	۸۹۲۹۸/۳۰	۵۸۷۴/۱۶	۷۵۰۴/۰۹	۹۸۲/۰۰
		۰/۵	۲۳۲۴۲۵۶۷/۶۶	۱۳۲۴۶۵۷/۷	۲۳۸۷۱۸۷۲/۱۷	۱۸۴۷۲۸۷/۴۱	۱۰۹۸۶۴/۴۹	۸۷۲۵/۶۲	۱۰۵۴۶/۴۱	۱۶۸۹/۱۱
		۰/۸	۲۳۶۲۸۷۴۲/۴۷	۱۴۲۶۷۲۸/۱	۲۴۴۶۸۷۸۹/۹۷	۱۹۸۸۱۷۸/۴۹	۱۳۵۲۴۶/۲۵	۲۸۹۷/۷۲	۹۸۲۴/۶۰	۱۳۵۷/۷۸
	ترابی-حسینی	۰/۲	۲۳۲۸۵۷۳۴/۷۸	۱۲۸۹۷۲۴/۲	۲۴۲۰۲۴۸۸/۱۱	۱۶۰۳۹۷۴/۱۷	۹۶۹۸۷/۰۰	۱۰۳۳۰/۶۴	۸۸۴۱/۱۱	۹۵۵/۸۷
		۰/۵	۲۳۶۵۲۱۵۴/۹۶	۱۳۳۳۰۴۷/۹	۲۴۷۰۷۴۴۳/۴۳	۱۸۰۴۲۳۲/۰۸	۱۰۶۵۶۷/۷۳	۹۲۱۲/۰۷	۱۳۱۵۰/۵۵	۱۰۸۷/۹۰
		۰/۸	۲۴۰۴۱۶۹۳/۴۰	۱۳۶۸۶۱۸/۵	۲۵۰۰۲۶۴۰/۶۲	۱۸۲۸۵۵۳/۷۱	۱۵۵۶۵۰/۱۶	۶۹۰۴/۸۷	۹۶۲۱/۵۲	۱۲۵۵/۷۳
۵	مجموع وزنی	۰/۲	۲۷۱۸۷۸۷۹/۲۴	۱۷۲۹۱۷۸/۴	۲۸۴۲۶۸۷/۴	۱۶۴۱۳۵۴/۶۳	۱۶۲۴۸۱/۳۵	۱۰۲۵۶/۱۲	۶۱۸۷۱/۷۵	۲۵۴۱/۶۳
		۰/۵	۲۷۵۶۵۴۴۹/۲۴	۱۷۷۱۶۸۷/۵	۲۸۹۸۷۲۱۲/۸۷	۱۸۵۲۶۸۸/۵۲	۱۳۵۴۵۶/۴۵	۱۹۸۲۷/۶۷	۳۵۲۴۸/۳۵	۲۴۸۷/۴۵
		۰/۸	۲۷۹۴۸۹۷۹/۶۹	۱۸۱۸۶۱۷/۳	۲۹۸۱۱۸۷۴/۸۱	۲۰۶۵۵۴۰/۹۸	۱۵۴۲۸۷/۷۸	۱۵۷۵۳/۳۲	۱۶۸۷۱/۲۴	۶۰۴۸/۵۳
	معیار جامع	۰/۲	۲۷۸۴۴۶۶۶/۴۶	۱۵۳۶۱۴۰/۸	۲۸۷۵۱۰۰/۱۵۳	۱۶۲۵۷۲۰/۵۹	۱۱۲۶۳۴/۶۰	۸۷۹۲/۹۰	۱۰۵۶۶/۰۹	۸۶۷/۰۹
		۰/۵	۲۸۲۸۳۰۴۴/۹۲	۱۵۷۴۲۸۲/۷	۲۹۲۵۸۳۳۳/۹۴	۱۸۴۶۲۵۴/۰۸	۱۰۷۲۸۱/۶۵	۷۳۱۱/۱۵	۱۱۰۰۳/۵۵	۱۰۹۳/۷۸
		۰/۸	۲۸۵۹۲۱۵۳/۹۲	۱۶۰۸۷۴۷/۴	۲۹۵۵۲۱۰/۱۷	۲۰۴۵۹۰۱/۹۵	۱۱۷۰۷۸/۲۹	۶۴۰۵/۰۹	۱۲۱۴۱/۲۷	۹۴۱/۰۴
	ترابی-حسینی	۰/۲	۲۸۳۱۷۰۵۷/۶۹	۱۵۳۰۳۳۹/۵	۲۹۲۰۱۱۹۴/۸۵	۱۶۲۰۹۵۱/۹۴	۱۱۳۵۵۰/۲۲	۸۰۰۶/۳۲	۹۵۵۱/۱۲	۱۱۱۴/۹۶
		۰/۵	۲۸۷۰۴۴۴۷/۵۸	۱۵۷۰۷۱۴/۵	۲۹۷۰۶۰۰/۶۳	۱۸۴۱۲۵۵/۱۹	۱۰۸۹۰۶/۴۳	۷۹۶۳/۳۳	۱۰۲۶۵/۷۶	۸۳۱/۷۰
		۰/۸	۲۹۰۳۵۸۵۷/۹۷	۱۶۰۲۵۹۶/۸	۳۰۰۰۷۴۳۵/۵۶	۲۰۴۰۶۴۴/۴۰	۱۲۶۲۵۸/۰۷	۵۷۴۶/۵۹	۱۱۸۲۶/۵۳	۱۲۷۰/۷۴

- [2] Guide, J.R., Van-Wassenhove, L.N., (2009). "OR FORUM-the evolution of closed-loop supply chain research", *Operations research*, 57(1): 10-18.
- [3] Souza, G.C., (2013). "Closed-Loop Supply Chains: A Critical Review, and Future Research", *Decision Sciences*, 44(1): 7-38.
- [4] Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., Laan, E., Nunen J.A.E.E., Wassenhove, L.N., (1997). "Quantitative models for reverse logistics: A review", *European journal of operational research*, 103(1): 1-17.
- [5] Govindan, K., Soleimani, H., Kannan, D., (2015). "Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future", *European Journal of Operational Research*, 240(3): 603-626.
- [6] Schultmann, F., Engels, B., Rentz, O., (2003). "Closed-loop supply chains for spent batteries", *Interfaces*, 33(6): 57-71.
- [7] Inderfurth, K., (2005). "Impact of uncertainties on recovery behavior in a remanufacturing environment: a numerical analysis", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 35(5): 318-336.
- [8] Sheu, J.B., Chou, Y.H., Hu, C.C., (2005). "An integrated logistics operational model for green-supply chain management", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(4): 287-313.
- [9] Ko, H.J., Evans, G.W., (2007). "A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs", *Computers & Operations Research*, 34(2): 346-366.
- [10] Listes, O., (2007). "A generic stochastic model for supply-and-return network design", *Computers & Operations Research*, 34(2): 417-442.
- [11] Üster, H., et al., (2007). "Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model", *Naval Research Logistics (NRL)*, 54(8): 890-907.
- [12] Chouinard, M., D'Amours, S., Ait-Kadi, D., (2008). "A stochastic programming approach for designing supply loops", *International Journal of Production Economics*, 113(2): 657-677.
- [13] Du, F., Evans, G.W., (2008). "A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service", *Computers & Operations Research*, 35(8): 2617-2634.
- [14] Lee, J.E., Gen, M., Rhee, K.G., (2009). "Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm", *Computers & Industrial Engineering*, 56(3): 951-964.
- [15] Pishvae, M.S., Jolai, F., Razmi, J., (2009). "A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design", *Journal of Manufacturing Systems*, 28(4): 107-114.
- [16] Qin, Z., Ji, X., (2010). "Logistics network design for product recovery in fuzzy environment", *European Journal of Operational Research*, 202(2): 479-490.

جدول (۷): مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری در رویکرد استوار

روش حل	مجموع وزنی	معیار جامع	ترابی-حسینی
معیار سنجش	$(F_j^* - F_j)/F_j^*$		
مقدار تابع هدف اول (قطعی)	-۱/۷۴	۰/۰۰	-۰/۷۶
مقدار تابع هدف دوم (قطعی)	-۱/۷۰	-۰/۰۲	۰/۰۰
مقدار تابع هدف اول (استوار)	-۱/۱۴	۰/۰۰	-۰/۱۴
مقدار تابع هدف دوم (استوار)	-۰/۲۰	-۰/۰۰۵	۰/۰۰
انحراف معیار تابع هدف ۱ (قطعی)	-۰/۰۳	۰/۰۰	-۰/۰۰۶
انحراف معیار تابع هدف ۲ (قطعی)	۰/۰۰	-۰/۱۱	-۰/۱۴
انحراف معیار تابع هدف ۱ (استوار)	-۰/۱۵	-۰/۰۱	۰/۰۰
انحراف معیار تابع هدف ۲ (استوار)	۰/۰۰	-۰/۰۲۲	-۰/۰۴۸
زمان حل (قطعی)	۰/۰۰	-۰/۰۵	-۰/۰۳
زمان حل (استوار)	۰/۰۰	-۲/۹۴	-۲/۱۸
فاصله پلکانی	۴/۹۹	۴/۱۶	۳/۳۱
فاصله مستقیم	۲/۷۰	۳/۹۴	۲/۳۱

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله یک مدل دو هدفه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته چند محصولی، چند دوره‌ای در دو حالت قطعی و غیرقطعی مورد بررسی قرار گرفت و مدل پیشنهادی در دو حالت قطعی و استوار نشان داده شد. برای بررسی عملکرد مدل‌های پیشنهادی از روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه، شامل روش معیار جامع، روش ترابی-حسینی و روش مجموع وزنی استفاده شد. مثال‌های عددی بی‌شماری برای هر کدام از روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج مقایسات در جداول مربوطه نشان داده شد. برای مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه از روش حل ایده آل جابجا شونده (فیلترینگ) بهره جستیم و مشاهده شد روش مجموع وزنی برای رویکرد قطعی و روش ترابی-حسینی برای رویکرد استوار بهترین نتایج ممکن را کسب کردند. با این حال هیچ‌کدام از روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه کارایی مناسبی نسبت به کل روش‌ها ندارند.

برای مطالعات آینده می‌توان مدل پیشنهادی ذکرشده را با در نظر گرفتن پارامترهای قطعی بیشتر و استفاده از برنامه‌ریزی فازی و یا احتمالی مورد بررسی قرار داد. با توجه به شکل (۲) مشاهده می‌شود در سائز بالاتر مسئله در زمان قابل قبولی حل نخواهد شد و بایستی از روش‌های تقریب زنی و یا الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل مسئله استفاده نمود. لذا همچنین با توجه به عدم کارایی روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه، پیشنهاد می‌شود برای مطالعات آینده از روش‌های بهتر و ایده آل تری استفاده شود. مدل پیشنهادی به خاطر پیچیدگی بیش‌از حد قابلیت استفاده در ابعاد بالا را ندارد و بایستی از روش‌های فرا ابتکاری برای حل این مدل در ابعاد بالاتر استفاده شود.

مراجع

- [1] Stevens, G.C., (1989). "Integrating the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*", 19(8): 3-8.

- [30] Hwang, C.L., Masud, A.S.M., (1979). "Multiple objective decision making-methods and applications", Springer.
- [31] Torabi, S.A., Hassini, E., (2008). "An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning", *Fuzzy Sets and Systems*, 159(2): 193-214.
- [17] Kara, S.S., S. Onut, (2010). "A two-stage stochastic and robust programming approach to strategic planning of a reverse supply network", *The case of paper recycling. Expert Systems with Applications*, 37(9): 6129-6137.
- [18] Pishvae, M.S., Farahani, R.Z., Dullaert, W., (2010). "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design", *Computers & operations research*, 37(6): 1100-1112.
- [19] Pishvae, M.S., Rabbani, M., S.A. Torabi, (2011). "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Applied Mathematical Modelling*, 35(2): 637-649.
- [20] Piplani, R., A. Saraswat, (2012). "Robust optimisation approach to the design of service networks for reverse logistics", *International Journal of Production Research*, 50(5): 1424-1437.
- [21] Mahmoudi, H., H. Fazlollahtabar, I. Mahdavi, (2013). "Mathematical Modeling for Minimizing Costs in a Multilayer Multi-Product Reverse Supply Chain", *Industrial Engineering & Management*, 2: 1-6.
- [22] Amin, S.H. and Zhang, G., (2013). "A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return", *Applied Mathematical Modelling*, 37(6): p. 4165-4176.
- [23] Ramezani, M., M. Bashiri, R. Tavakkoli-Moghaddam, (2013). "A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level", *Applied Mathematical Modelling*, 37(1): 328-344.
- [24] Özceylan, E., Paksoy, T., Bektaş, T., (2014). "Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 61: 142-164.
- [25] Soleimani, H., Seyyed-Esfahani, M., Kannan, G., (2014). "Incorporating risk measures in closed-loop supply chain network design", *International Journal of Production Research*, 52(6): 1843-1867.
- [26] Rezaee, A., Dehghanian, F., Fahimnia, B., Beamon, B., (2015). "Green supply chain network design with stochastic demand and carbon price", *Annals of Operations Research*, 250(2): 463-485.
- [27] Ben-Tal, A., Nemirovski, A., (1998). "Robust convex optimization. *Mathematics of Operations Research*, 23(4): 769-805.
- [28] Ben-Tal, A., Nemirovski A., (2000). "Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data", *Mathematical programming*, 88(3): 411-424.
- [29] Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam R., Modarres, M., A. Baboli, (2012). "Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: a robust-M/M/c queuing model", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(6): 1152-1168.



Design of Multi-objective Multi-product Multi Period Green Supply Chain Network with Considering Discount under Uncertainty

J. Ghahremani nahr¹, A. Ghodratnama^{1,*}, H.R. Izadbakhsh¹, R. Tavakkoli Moghaddam²

¹ Department of Industrial Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 January 2016

Accepted 5 December 2015

Keywords:

Green closed loop supply chain

MODM

Robust optimization

Uncertainty

ABSTRACT

In today's world, changes in the economy and industry field occur in higher speed compared to the past time. The main aim of organizations and companies is to preserve and increase the benefit as well as survive in the commercial fields. This matter has caused in large scale because of that companies the globalization economical activity along with the rapid Increase of the technical and restricted sources to compete closely together. For the companies, the competitive benefits for example as to become efficient related to the affairs such as supply chain. Additionally, because of governmental rules, green affairs and development the social responsibility concept, management the closed loop supply chain field has attained many researches interests. Closed loop Supply chain involve forward and reverse both together and the main aim of its designing is to mix up the environmental observations with the traditional supply chain using accumulating the used products and operations related to them as well. In this paper a multi objective multi period multi product closed loop supply chain mathematical model considering green matters and compensative shortage as well as discounts has been developed. Firstly, closed loop supply chain mathematical model has been solved using three multi objective decision maker methods and numerical results have been reported in large scale. Secondly, regarding to the uncertainty of some of the parameters, the robust optimization model related to the main model has been formed and solved using multi objective decision maker methods.

* Corresponding author. A. Ghodratnama
Tel.: 026-3459555; E-mail address: ghodratn@ut.ac.ir