

طراحی یک شبکه زنجیره تأمین دارویی تحت شرایط عدم قطعیت و لجستیک معکوس

مقاله علمی - پژوهشی

دانیال فروغی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، ایران
حمیدرضا کیا*، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Hamid.R.Kia@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۷۴-۵۵

چکیده

طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین، همواره از دیدگاه صنعت‌گران و تصمیم‌گیرندگان مهم بوده است. بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین با ظهور زنجیره تأمین کالاهای فاسد شدنی به ویژه داروهای فاسد شدنی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، چرا که مدیریت موجودی برای جلوگیری از فاسدشدن و مواجهه با کمبود داروها از جمله تصمیمات حیاتی در این زنجیره است. در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط دو هدفه جدید با در نظر گرفتن لجستیک رو به جلو و معکوس به منظور مدیریت تولید داروهای فاسدشدنی و همچنین مدیریت توزیع پیشنهاد شده است. این زنجیره تأمین چند سطحی شامل تأمین‌کنندگان، مراکز تولید بالقوه، مراکز توزیع بالقوه، مراکز باز یافت بالقوه، مراکز دورریز بالقوه و بازار محصولات باز یافتی همراه با فرض چند دوره‌ای و چندمحصولی است. در نظر گرفتن تخفیف در خرید از تأمین‌کنندگان، انبارش در مراکز توزیع، عدم قطعیت در تقاضا و استفاده از کالاهای جایگزین برای جلوگیری از مواجهه با کمبود در راستای برآورده نمودن معیار اجتماعی از جمله نوآوری‌های این پژوهش بشمار می‌آید. برای حل مدل غیرخطی دوهدفه پیشنهادی شامل کمینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره و کمینه‌سازی بیشینه کمبود، از تکنیک خطی‌سازی و تبدیل مدل دوهدفه به مدل تک‌هدفه تحت شرایط عدم قطعیت فازی استفاده شد. بعد از اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، ۱۲ نمونه مسئله بطور تصادفی و در ابعاد مختلف برای سنجش کارایی مدل تولید گردید و در نرم‌افزار گمز حل گردید. کارایی مدل پیشنهادی در مجموعه‌ی پارتنر بدست آمده برای یک نمونه مسئله‌ی خاص نشان داده شد. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که با افزایش درصد محصولات باز یافتی تنها تابع هدف اول افزایش می‌یابد و تابع هدف دوم تغییری نمی‌کند. این مقاله می‌تواند به مدیران کمک کند تا از لجستیک معکوس، باز یافت محصولات فاسد شدنی و توجه به معیارهای اجتماعی به منظور کسب امتیاز رقابتی در سراسر زنجیره تأمین دارو بهره‌مند شوند.

واژه‌های کلیدی: طراحی شبکه زنجیره تأمین، عدم قطعیت، لجستیک معکوس، محصولات فاسدشدنی

۱- مقدمه

که جان یک انسان نجات پیدا کرده است. برای مثال، در بیمارستانی که ۱۵ هزار عمل انجام می‌شود، اگر یک درصد بهبود ایجاد گردد، معادل ۱۵۰ بیمار خواهد شد. بنابراین، ۱۵۰ بیمار زودتر سرویس دریافت خواهند کرد و سلامت خودشان را زودتر به دست خواهند آورد (Ataei, Sadeghian and Hamed, 2019). کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش

امروزه صنعت زنجیره تأمین دارو و مدیریت مراقبت‌های بهداشتی با چالش‌ها و هزینه‌های مالی بیشتری نسبت به قبل مواجه است. اگر در حوزه تولید از دانش مهندسی صنایع استفاده گردد قاعدتاً باید از درصد بهبود قانع‌کننده‌ای در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد برخوردار شد اما در حوزه سلامت و درمان اگر حتی یک درصد هم بهبود حاصل گردد، آن یک درصد بسیار ارزشمند است چرا

باید به مراکز دورریز انتقال یابد یا به مراکز بازیافت حمل شود. در مراکز بازیافت، محصولات بازگشتی به محصولات بازیافتی تبدیل شده و برای استفاده مجدد به بازار (ثانویه) محصولات بازیافتی ارسال می‌شوند.

اهداف اصلی ما در این تحقیق شامل موارد زیر است.

• طراحی و توسعه‌ی یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط دوهدفه جدید در حوزه دارو به منظور مدیریت تولید، توزیع و بازیافت داروهای فاسد شدنی.

• حداقل‌سازی هزینه‌های کل شبکه.

• در نظر گرفتن معیارهای اجتماعی از طریق عدم مواجهه با کمبود می‌تواند موجب کاهش حداکثر تقاضای نامطلوب شود.

۲- پیشنهاد تحقیق

هر چند مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین دارو در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. (Jamshidi and Boyerhasani, 2019) (Ataei, Sadeghian and Hamed, 2019) اما در مرور ادبیات مقالات گذشته نیز قابل مشاهده است (Torabi and Hassini, 2009). ترابی و هسینی در سال ۲۰۰۹ (Torabi and Hassini, 2009) یک مدل فازی یکپارچه برای تامین کالا و توزیع و حمل‌ونقل کالاها با چهار هدف ارائه کردند که شامل حداقل کردن کل هزینه‌های لجستیکی، حداکثر کردن کل ارزش خریداری شده، حداقل سازی اقلام آسیب‌دیده و در نهایت حداقل سازی سفارش‌هایی که با تأخیر دریافت می‌شوند. مدل اولیه با استفاده از یک برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط چندهدفه، فرمول‌بندی شد. به منظور مقابله با عدم قطعیت ذاتی که در داده‌های اصلی وجود دارد و همچنین عدم قطعیتی که در تابع هدف وجود دارد، از برنامه‌ریزی فازی تعاملی آرمانی استفاده شد. سپس این مدل به وسیله یک تکنیک ریاضی، فازی‌زدایی شد و در نهایت به مدل قطعی تبدیل شد. سپس با استفاده از پارامترهای فازی‌زدایی قطعی شده، جواب‌های نهایی با توجه به چهار تابع هدف به دست آمد.

حبیبی کوچکسرایبی، پایدار و اسدی گنگراج (Habibi-Kouchaksaraei, Paydar and Asadi-Gangraj, 2018) یک مدل دوهدفه‌ی چندسطحی استوار برای مسئله‌ی زنجیره‌ی تامین خون در شرایط وقوع بحران ارائه دادند. در این زنجیره، سه سطح شامل تامین‌کننده، پردازش‌کننده و توزیع‌کننده

اثرات اجتماعی و نیز سود سازمان‌ها توجه زیادی را به مشکلات شبکه زنجیره تامین در حوزه دارو جلب کرده است. صنعت داروسازی را می‌توان مجموعه‌ای از عملیات‌ها، فرآیندها و تعامل بین سازمان‌ها به منظور کشف، توسعه و تولید دارو تعریف کرد. مدیریت زنجیره تامین دارو و مراقبت‌های بهداشتی به اطلاعات، منابع و امور مربوط به خرید و انتقال محصولات و خدمات از عرضه‌کننده به کاربر نهایی به منظور افزایش نتایج بالینی در حین کنترل هزینه‌ها اشاره می‌کند (Jamshidi and Boyerhasani, 2019). در این پژوهش، یک زنجیره تامین دارو طراحی خواهد شد که این زنجیره تامین دارو چند محصولی، چند دوره‌ای و چند سطحی است که شامل چندین تامین‌کننده، چندین تولیدکننده، مراکز توزیع، خرده‌فروشان، مرکز جمع‌آوری محصولات بازگشتی، مراکز دورریز، مراکز بازیافت و بازار (ثانویه) محصولات بازیافتی می‌باشد. این زنجیره شامل دو جریان پیشرو و برگشتی می‌باشد.

در جریان پیشرو، مواد اولیه داروها از تامین‌کنندگان به تولیدکنندگان دارو ارسال شده و بعد از تولید داروها توسط آنها به توزیع‌کنندگان منتقل می‌گردد و در نهایت داروها به خرده‌فروشان حمل می‌گردند. اما در جریان برگشتی، داروهای فاسد شده از خرده‌فروشان به مرکز جمع‌آوری انتقال یافته و بعد از بازرسی یا به مراکز دورریز منتقل شده و یا جهت فروش در بازار ثانویه به مراکز بازیافت حمل می‌گردند.

در این زنجیره تامین، مواد اولیه از تامین‌کنندگان خریداری شده و به مراکز تولید ارسال می‌گردد. برای خرید مواد اولیه، هر تامین‌کننده یک سیاست تخفیف دارد و خرید از هر تامین‌کننده براساس معیارهای هزینه ارتباط با تامین‌کننده، قیمت خرید با در نظر گرفتن تخفیف، هزینه حمل‌ونقل و ظرفیت تامین‌کننده صورت می‌گیرد. در مراکز تولید، با ترکیب بهینه مواد اولیه با یکدیگر، محصول مورد نظر تولید شده و در اختیار مراکز توزیع قرار می‌گیرد. مراکز توزیع، محصولات را به خرده‌فروشان (بیمارستان‌ها و داروخانه‌ها) تحویل می‌نمایند (شکل ۱). برنامه‌ریزی موجودی در انبار توزیع‌کنندگان، جهت جلوگیری از فساد محصولات، از تصمیمات کلیدی در این تحقیق است. محصولات معیوب یا فاسدشده، از خرده‌فروشان به مرکز جمع‌آوری محصولات بازگشتی که در توزیع‌کننده مستقر است، بازگردانده می‌شود. در مرکز جمع‌آوری، محصولات بازگشتی مورد بازرسی قرار گرفته و تصمیم اتخاذ می‌گردد که آیا محصول

در نظر گرفته شده است. اهداف مسئله شامل حداقل سازی کل هزینه‌ها و همچنین ارضای نیازها به خون است. در نهایت یک نمونه‌ی موردی به منظور سنجش کارایی الگوریتم پیشنهاد شده است. رفیعی مجد، پسندیده و نادری (Rafie-Majd, Pasandideh and Naderi, 2018) مسئله مکان‌یابی- مسیریابی- موجودی را بصورت زنجیره تأمین سه سطحی با محصولات فاسدشدنی بررسی کرده‌اند. در این مدل چند تأمین‌کننده در نظر گرفته شده است. تقاضا غیر قطعی بوده و از توزیع نرمال پیروی می‌کند و تقاضای مشتریان از یکدیگر مستقل هستند. سیاست کنترل موجودی بصورت مرور دائم (Q,r) در یک سیستم چندمحصولی و چند دوره‌ای است. هر نوع از محصولات تاریخ انقضای مربوط به خود را دارند. هر وسیله نقلیه فقط یک مسیر را در هر دوره طی می‌کند. برای حل مدل از روش لاگرانژ استفاده شده است.

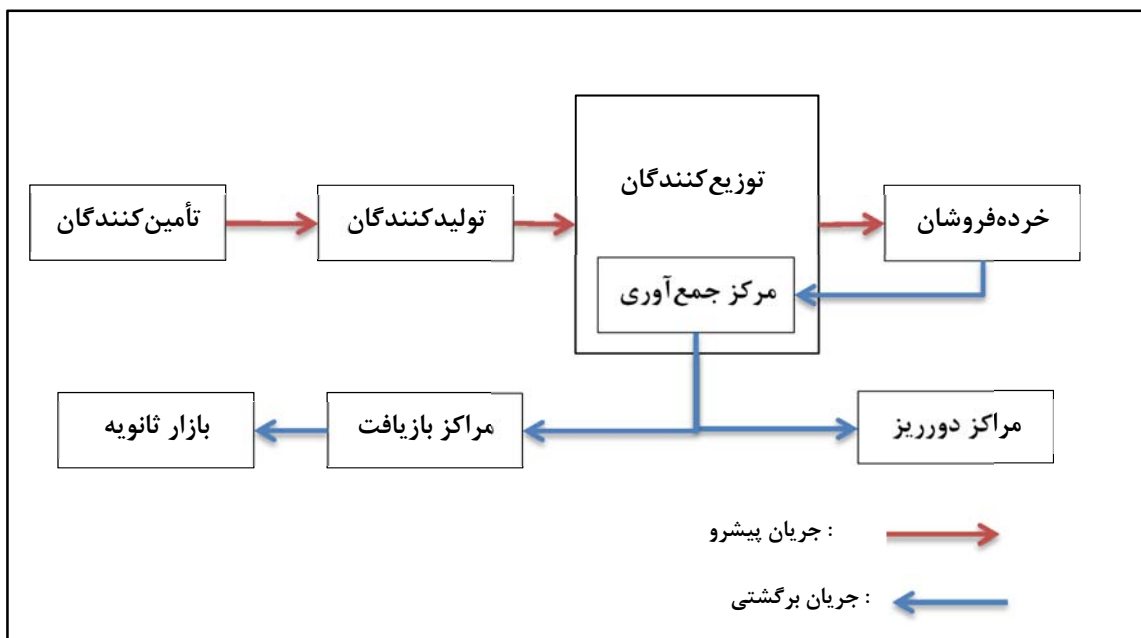
روشن، توکلی مقدم و رحیمی (Roshan, Tavakkoli-Moghaddam and Rahimi, 2019) یک مدل ریاضی جدید چندهدفه برای PSCNDP در شرایط بحران پیشنهاد دادند. آنها به مدیریت بحران در زنجیره‌های تأمین دارو پرداختند که اهداف آن شامل به حداقل رساندن هزینه کل شبکه و تقاضای برآورده نشده همراه با به حداکثر رساندن سطح رضایت مسئولیت اجتماعی است. علاوه بر این، قابلیت جانشینی محصولات با عدم قطعیت تقاضا را در نظر می‌گیرد. در نهایت، یک مطالعه موردی برای مقاله ارائه دادند. ساها و ری (Saha and Ray, 2019) یک مقاله‌ی مروری در مورد مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌های مدیریت موجودی در حوزه‌ی زنجیره تأمین سلامت و دارو ارائه کردند. از ویژگی‌های مهم آن به حداقل رساندن هزینه‌های مربوط به موجودی و همچنین به حداکثر رساندن سطح خدمات با کاهش قابل توجه در هزینه‌های درمان و اتلاف منابع است. گودرزیان، حسینی‌نسب، مونوزوری و فخرزاد (Goodarzian, Hosseini-Nasab, Muñuzuri and Fakhrzad, M, 2020) یک PSCNDP چندهدفه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در هزینه‌های سفارش‌دهی، خرید و تحویل را مطالعه کردند. آنها سه روش فراابتکاری برای این مسئله پیشنهاد دادند.

همواره توجه به معیارهای اجتماعی و یا زیست محیطی نیز در طراحی شبکه زنجیره تأمین بسیار مورد اهمیت بوده است (Sazvar, et al., 2021). قدرت نما، حسن نیا و میرزا زاده Hassannia and Mirzazadeh, Ghodratnama,)

2017) یک روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی برای حل مدل ریاضی چندهدفه تحت شرایط عدم قطعیت طراحی کردند. هدف زنجیره تأمین آن‌ها، حداقل‌سازی هزینه‌ها همراه با برآورده کردن تقاضای مشتری با بالا نگه‌داشتن مقدار سود است. برای حل مدل ریاضی، از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی چندهدفه استفاده شده است و با یک مثال عددی نتایج بدست آمده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. میچلی و مانتلا (Micheli and Mantella, 2018) یک مدل برای مسئله مسیریابی- موجودی سازگار با محیط‌زیست همراه با عدم قطعیت تقاضا و یک ناوگان ناهمگن تحت سیاست‌های کنترل کربن ارائه دادند. آن‌ها یک فرمول‌بندی گسترده زیست‌محیطی از مسئله مسیریابی- موجودی را توسعه دادند. فرقانی، وحدت زاد و صادقیه (Forghani, Vahdat-Zad and Sadegheih, 2018) یک مدل ریاضی جدید مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط ارائه دادند و برای حل آن یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت برای مسئله مسیریابی-موجودی چند دوره‌ای، چندمحصولی، چندوسیله‌ای همراه با جریان معکوس را استفاده کردند. سوادکوهی، موسی‌زاده و ترابی (Mousazadeh and Torabi, Savadkoohi, 2018) یک PSCNDP برای زنجیره تأمین سه سطحی، چند محصولی و چند دوره‌ای توسعه دادند. آنها یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط برای حل مدل پیشنهاد دادند. زهیری، جولای و توکلی مقدم (Tavakkoli- Zahiri, Jula and Moghaddam, 2018) یک PSCNDP تحت شرایط عدم قطعیت با توجه به فاسد شدن و جایگزینی محصولات طراحی کردند. آنها یک مدل ریاضی دوهدفه برای PSCNDP ارائه دادند. آنها یک رویکرد بهینه‌سازی جدید ارائه دادند و کارایی آن را با استفاده از یک مطالعه موردی در صنعت دارویی نشان دادند. عطایی، صادقیان و حامدی (Ataei, Sadeghian and Hamed, 2019) یک مدل چندهدفه جهت مکان‌یابی مراکز توزیع و مسیریابی خودروهای توزیع خون در شرایط بحران ارائه دادند. اهداف مدل شامل کمینه کردن کمبود خون، بیشینه کردن رضایت‌مندی افراد آسیب‌دیده و کمینه کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و مکان‌یابی می‌باشد. در نظر گرفتن حالت عدم قطعیت سناریویی به همراه ریسک اختلال و رضایت افراد آسیب‌دیده از جمله نوآوری‌های آنها است. مدل پیشنهادی در ابعاد کوچک و متوسط با الگوریتم محدودیت افسیلون حل شد و برای مطالعه موردی از الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب استفاده شده است.

دریان (Taleizadeh, Haji-Sami and Noori-daryan, 2020) یک مدل بهینه‌سازی استوار برای هماهنگی لجستیک معکوس دارویی ارائه دادند. آن‌ها نقش مشتری و قیمت پیشنهادی مشتری را که می‌تواند انگیزه‌ای برای شرکت‌های لجستیک طرف سوم به منظور جمع‌آوری اقلام بازگشتی باشد، در نظر گرفتند تا هم بتواند به زنجیره سود برساند و هم منجر به پایداری در شبکه دارو گردد. سازور و همکاران (Sazvar, et al., 2021) یک زنجیره تامین دارویی حلقه بسته پایدار را با در نظر گرفتن بازار رقابتی، برند تولید کننده و عدم قطعیت تقاضا مطالعه کردند. یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله توسعه داده شد و نتایج حل حاکی از کارایی مدل پیشنهادی است.

جمشیدی و بویرحسنی (Jamshidi and Boyerhasani, 2019) یک مدل مکان‌یابی تسهیلات برای یک شبکه زنجیره تامین حلقه‌بسته سبز متشکل از تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مشتریان، مراکز بازیافت و انهدام ارائه دادند. از این رو، یک مدل برنامه‌ریزی خطی ترکیبی دوهدفه جهت طراحی شبکه با در نظر گرفتن اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های کل شبکه و میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن در فرآیندهای حمل‌ونقل، تولید، بازیافت و انهدام پیشنهاد داده است. برای حل مدل دو هدفه و نشان دادن موازنه بین اهداف از روش محدودیت افسیلون استفاده شده است. کاربردی بودن مدل با حل یک مثال عددی و تحلیل حساسیت نشان داده شده است. طالعی زاده، حاجی سامی و نوری



شکل ۱. نمای کلی مسئله

- در نظر گرفتن سیاست تخفیف در خرید مواد اولیه دارو از تامین‌کنندگان.
- در نظر گرفتن امکان جایگزینی داروها در راستای کاهش کمبود دارو.
- در نظر گرفتن جریان لجستیک معکوس برای محصولات فاسدشدنی و امکان فروش محصولات بازیافتی در بازار ثانویه
- حداقل‌سازی حداکثر مقدار کمبود داروهای غیرقابل جایگزین در راستای مسئولیت اجتماعی.

جدول ۱ علاوه بر نشان دادن مرور ادبیات مقالات اخیر در این حوزه، به مقایسه این پژوهش با سایر مقالات مرتبط می‌پردازد. با توجه به مطالعه مرور ادبیات نوآوری‌های مقاله به شرح زیر می‌باشد.
- توسعه‌ی یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط دوهدفه جدید برای PSCNDP.
- در نظر گرفتن حالت عدم قطعیت فازی برای تقاضای.
- در نظر گرفتن فسادپذیری دارو در انبارش مراکز توزیع در دوره‌های آتی علاوه بر فرض محدودیت ظرفیت مراکز توزیع.

جدول ۱. مرور ادبیات موضوع بر اساس معیارهای استخراج شده

نویسنده و سال	حوزه دارو	مکان‌یابی	عدم قطعیت	فساد پذیری	تخفیف	لجستیک معکوس	اقتصادی	اجتماعی	زیست محیطی
ترابی و هسینی ۲۰۰۹	X	X	X				X	X	
قدرت‌نما و همکاران ۲۰۱۷		X	X				X	X	
حبیبی و همکاران ۲۰۱۸	X	X		X			X		
زهیری و همکاران ۲۰۱۸	X	X	X	X	X		X	X	
رفیعی مجد و همکاران ۲۰۱۸	X	X	X	X			X		
میچلی و مونتلا ۲۰۱۸		X	X				X	X	X
فرقانی و همکاران ۲۰۱۸		X	X			X	X		
سها و ری ۲۰۱۹	X	X	X	X			X	X	
روشن و همکاران ۲۰۱۹	X	X	X	X			X	X	
عطائی و همکاران ۲۰۱۹		X	X	X			X	X	
جمشیدی و همکاران ۲۰۱۹		X	X	X		X	X	X	X
گودرزبان و همکاران ۲۰۲۰	X	X	X	X			X		
طلعی زاده و همکاران ۲۰۲۰	X	X	X	X		X	X	X	X
سازور و همکاران ۲۰۲۱	X	X	X	X		X	X	X	X
این پژوهش	X	X	X	X	X	X	X	X	X

۳- مدل‌سازی ریاضی

- مفروضات اصلی مسئله به شرح ذیل می‌باشد.
- این زنجیره تأمین دارو چند سطحی است که شامل چندین تأمین‌کننده، چندین تولیدکننده، مراکز توزیع، خرده‌فروشان، مرکز جمع‌آوری محصولات بازگشتی (که خود، متشکل از مراکز دورریز و مراکز بازیافت است) و بازار (ثانویه) محصولات بازیافتی می‌باشد.
- در زنجیره مورد بررسی هر دو جریان رو به جلو و لجستیک معکوس برای طراحی شبکه در نظر گرفته شده است.
- نوع شبکه مورد بررسی به صورت چندمحصولی و چنددوره‌ای است.
- محصولات از نوع فاسدشدنی هستند (هر محصول دارای طول عمر مشخص است).
- امکان انبارش محصولات در انبار توزیع‌کنندگان وجود دارد.
- مکان‌یابی مراکز تولید، توزیع، بازیافت و دورریز توسط مدل صورت می‌پذیرد.
- هر مرکز دارای ظرفیت مشخص است.
- تمام تأمین‌کنندگان امکان تهیه همه‌ی انواع مواد اولیه را دارند.
- برای خرید مواد اولیه از تأمین‌کنندگان، سیاست‌های تخفیف وجود دارد.
- تمامی محصولات بازگشتی باید از خرده‌فروشان تحویل گرفته شود.
- چندین دوره برنامه‌ریزی وجود دارد و افق برنامه‌ریزی ثابت و محدود می‌باشد.
- محل قرارگیری تأمین‌کنندگان و خرده‌فروشان در این پژوهش ثابت فرض می‌شود.
- پارامتر تقاضا یا تقاضای مصرف دارو بصورت فازی تعریف می‌شود.

۳-۱- اندیس‌ها

- s تأمین‌کننده مواد اولیه
- m مرکز تولید بالقوه محصولات
- a مواد اولیه
- b, b' محصول
- i مرکز توزیع بالقوه

c	بازار محصولات بازاریافتی	j	خرده‌فروش
f	سطح قیمت	k	مرکز بازاریافت بالقوه
t	دوره زمانی	n	مرکز دورریز بالقوه

۳-۲- پارامترها

OC_{st}	هزینه ثابت ارتباط با تأمین‌کننده s برای خرید مواد اولیه در دوره زمانی t
MC_m	هزینه راه‌اندازی مرکز تولید m برای تولید محصولات
DC_i	هزینه راه‌اندازی مرکز توزیع i
RC_k	هزینه راه‌اندازی مرکز بازاریافت k
DSC_n	هزینه راه‌اندازی مرکز دورریز n
CaS_{ast}	حداکثر ظرفیت تأمین‌کننده s در تأمین ماده اولیه a در دوره زمانی t
CaM_{bmt}	حداکثر ظرفیت مرکز تولید m برای تولید محصول b در دوره زمانی t
CaD_{bit}	حداکثر ظرفیت مرکز توزیع i برای تحویل محصول b به خرده‌فروشان در دوره زمانی t
CaD'_{bit}	حداکثر ظرفیت مرکز توزیع i برای دریافت محصول بازگشتی b در دوره زمانی t
CaR_{bkt}	حداکثر ظرفیت مرکز بازاریافت k برای بازاریافت محصول b در دوره زمانی t
$CaDS_{nt}$	حداکثر ظرفیت مرکز دورریز n برای انهدام محصولات در دوره زمانی t
DMR_{bxt}	حداکثر تقاضای مورد نیاز بازار محصولات بازاریافتی c برای محصول بازاریافتی b در دوره زمانی t
DR_{bjt}	تقاضای محتمل خرده‌فروش j برای محصول b در دوره زمانی t
DRU_{bjt}	حد بالای تقاضای خرده‌فروش j برای محصول b در دوره زمانی t
ξ_{2b}	درصدی از ماده اولیه a که برای تولید یک واحد از محصول b استفاده می‌گردد
η_{bjt}	درصد محصول b بازگشتی از خرده‌فروش j در دوره زمانی t
η'_i	میانگین درصد محصول b قابل بازاریافت که توسط مرکز توزیع i جداسازی می‌گردد
$TrSM_{ast}$	هزینه انتقال هر واحد ماده اولیه a از تأمین‌کننده s به مرکز تولید m در دوره زمانی t
$TrMD_{mit}$	هزینه انتقال هر واحد محصول b از تولیدکننده m به مرکز توزیع i در دوره زمانی t
TrR'_{bjt}	هزینه انتقال هر واحد محصول b از مرکز توزیع i به خرده‌فروش j در دوره زمانی t
$TrRD_{bjt}$	هزینه انتقال هر واحد محصول بازگشتی b از خرده‌فروش j به مرکز توزیع i در دوره زمانی t
$TrDR_{bikt}$	هزینه انتقال هر واحد محصول b از مرکز توزیع i به مرکز بازاریافت k در دوره زمانی t
$TrDD_{bint}$	هزینه انتقال هر واحد محصول b از مرکز توزیع i به مرکز دورریز n در دوره زمانی t

TrR_{bkct}	هزینه انتقال هر واحد محصول b از مرکز بازیافت k به بازار محصولات بازیافتی c در دوره زمانی t
PrS_{afst}	قیمت ارایه شده توسط تأمین کننده s برای ماده اولیه a در سطح قیمت f در دوره زمانی t
PrM_{bmt}	هزینه تولید هر واحد محصول b در مرکز تولید m در دوره زمانی t
PH_{bit}	هزینه پردازش هر واحد محصول b انتقالی به خرده‌فروشان در مرکز توزیع i در دوره زمانی t
PrD_{it}	هزینه پردازش هر واحد محصول بازگشتی b در مرکز توزیع i در دوره زمانی t
PrR_{bkt}	هزینه بازیافت هر واحد محصول b در مرکز بازیافت k در دوره زمانی t
$PrDS_{bmt}$	هزینه انهدام هر واحد محصول b در مرکز دورریز n در دوره زمانی t
PCM_{bct}	قیمت فروش هر واحد محصول بازیافتی b در بازار محصولات بازیافتی c در دوره زمانی t
PH_{bit}	هزینه نگهداری هر واحد محصول b در انبار مرکز توزیع i در دوره زمانی t
ρ_{it}	جریمه مواجهه با کمبود برای محصول b در دوره زمانی t
α_b	طول عمر محصول b
VL_b	حجم محصول b
DU_{afst}	حد بالای مقدار تخفیف برای خرید ماده خام a از تأمین کننده s در سطح قیمت f در دوره زمانی t
DL_{afst}	حد پایین مقدار تخفیف برای خرید ماده خام a از تأمین کننده s در سطح قیمت f در دوره زمانی t
$\Omega_{bb'} \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	یک ماتریس منطقی هر گاه یک جفت از محصولات قابل جایگزینی باشند در غیر این صورت
M	عدد بسیار بزرگ

۳-۳- متغیرها

$\psi M_m \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	Binary	در صورتی که مرکز تولید m راه‌اندازی شود در غیر این صورت
$\psi D_i \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	Binary	در صورتی که مرکز توزیع i راه‌اندازی شود در غیر این صورت
$\psi R_k \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	Binary	در صورتی که مرکز بازیافت k راه‌اندازی شود در غیر این صورت
$\psi DS_n \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	Binary	در صورتی که مرکز دورریز n راه‌اندازی شود در غیر این صورت
$\psi S_{afst} \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	Binary	در صورتی که برای خرید ماده اولیه a با تأمین کننده s در سطح قیمت f ارتباط گرفته شود در غیر این صورت

δS_{afst}	Positive	میزان ماده اولیه a خریداری شده از تأمین‌کننده s توسط کارخانه m در سطح قیمت f در دوره زمانی t
δM_{bmit}	Positive	میزان محصول b انتقالی از مرکز تولید m به مرکز توزیع i در دوره زمانی t
δD_{bjt}	Positive	میزان محصول b انتقالی از مرکز توزیع i به خرده‌فروش j در دوره زمانی t
δ_{bjit}	Positive	میزان محصول بازگشتی b از خرده‌فروش j به مرکز توزیع i در دوره زمانی t
δR_{bikt}	Positive	میزان محصول b انتقالی از مرکز توزیع i به مرکز بازیافت k در دوره زمانی t
δDS_{bint}	Positive	میزان محصول b انتقالی از مرکز توزیع i به مرکز دورریز n در دوره زمانی t
δMR_{bkct}	Positive	میزان محصول بازیافتی b انتقالی از مرکز بازیافت k به بازار محصولات بازیافتی c در دوره زمانی t
IN_{bit}	Positive	میزان موجودی محصول b در انبار توزیع‌کننده i در دوره زمانی t

۳-۴- توابع هدف و محدودیت‌ها

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z_1 = & \sum_{a,f,s,t} OC_{st} \times \psi S_{afst} + \sum_m MC_m \times \psi M_m + \sum_i DC_i \times \psi D_i + \sum_k RC_k \times \psi R_k + \\
 & \sum_n DSC_n \times \psi DS_n + \sum_{a,f,s,m,t} TrSM_{asmt} \times \delta S_{afst} + \sum_{b,m,i,t} TrMD_{bmit} \times \delta M_{bmit} + \\
 & \sum_{b,b',i,j,t} TrR'_{bjit} \times \Omega_{bb'} \times \delta D_{bjt} + \sum_{b,j,i,t} TrRD_{bjit} \times \delta_{bjit} + \sum_{b,i,k,t} TrDR_{bikt} \times \delta R_{bikt} + \sum_{b,i,n,t} TrDD_{bint} \times \delta DS_{bint} + \\
 & \sum_{b,k,c,t} TrR_{bkct} \times \delta MR_{bkct} + \sum_{a,f,s,m,t} PrS_{afst} \times \delta S_{afst} + \sum_{b,m,i,t} PrM_{bmt} \times \delta M_{bmit} + \\
 & \sum_{b,i,j,t} PrD_{bit} \times \delta D_{bjt} + \sum_{b,j,i,t} PrD'_{bit} \times \delta_{bjit} + \sum_{b,i,k,t} PrR_{bkt} \times \delta R_{bikt} + \sum_{b,i,n,t} PrDS_{bint} \times \delta DS_{bint} + \\
 & \sum_{b,i,t} PH_{bit} \times IN_{bit} + \sum_{b,j,t} \rho_{bt} \times \left(\frac{DRO_{bjt} + 4 \times DR_{bjt} + DRU_{bjt}}{6} - \sum_i \delta D_{bjit} \right) - \sum_{b,k,c,t} PCM_{bct} \times \delta MR_{bkct}
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Min } Z_2 = \text{Max}_{b,j,t} \tau_{bj} \left(\frac{DRO_{bjt} + 4 \times DR_{bjt} + DRU_{bjt}}{6} - \sum_{b',i} \Omega_{b'b} \delta D_{bjit} \right) \quad (2)$$

S.t:

$$\sum_{f,m} \delta S_{afst} \leq CaS_{ast} \quad \forall a,s,t \quad (3)$$

$$\sum_i \delta M_{bmit} \leq CaM_{bmt} \quad \forall b,m,t \quad (4)$$

$$\sum_j \delta D_{bjt} \leq CaD_{bit} \quad \forall b,i,t \quad (5)$$

$$\sum_j \delta_{bjit} \leq CaD'_{bit} \quad \forall b,i,t \quad (6)$$

$$\sum_i \delta R_{bikt} \leq CaR_{bkt} \quad \forall b,k,t \quad (7)$$

$$\sum_{b,i} \delta DS_{bint} \times VL_b \leq CaDS_{nt} \quad \forall n,t \quad (۸)$$

$$\delta S_{afst} \leq DU_{afst} + M \times (1 - \psi S_{afst}) \quad \forall a,f,s,m,t \quad (۹)$$

$$\delta S_{afst} + M \times (1 - \psi S_{afst}) > DL_{afst} \quad \forall a,f,s,m,t \quad (۱۰)$$

$$\sum_f \psi S_{afst} \leq 1 \quad \forall a,s,t \quad (۱۱)$$

$$\frac{\sum_{f,s} \delta S_{afst}}{\xi_{ab}} \geq \sum_i \delta M_{bmit} \quad \forall a,b,m,t \quad (۱۲)$$

$$IN_{bit} = \sum_m \delta M_{bmit} - \sum_j \delta D_{bijt} \quad \forall b,i,t=1 \quad (۱۳)$$

$$IN_{bit} = IN_{bi(t-1)} + \sum_m \delta M_{bmit} - \sum_j \delta D_{bijt} \quad \forall b,i,t > 1 \quad (۱۴)$$

$$\sum_i \delta D_{bijt} \leq \frac{DRO_{bjt} + 4 \times DR_{bjt} + DRU_{bjt}}{6} + \sum_i \delta_{bjit} \quad \forall b,j,t \quad (۱۵)$$

$$\delta_{bjit} = \eta_{bjt} \times \delta D_{bijt} \quad \forall b,i,j,t > \alpha_b \quad (۱۶)$$

$$\delta_{bjit} = 0 \quad \forall b,i,j,t \leq \alpha_b \quad (۱۷)$$

$$IN_{bit} \leq \sum_{j,t'=t+1}^{t+\alpha_b-1} \delta D_{bijt'} \quad \forall b,i,t \quad (۱۸)$$

$$\sum_j \delta_{bjit} = \sum_k \delta R_{bikt} + \sum_n \delta DS_{bint} \quad \forall b,i,t \quad (۱۹)$$

$$\sum_k \delta R_{bikt} = \eta'_{bi} \times \sum_j \delta_{bjit} \quad \forall b,i,t \quad (۲۰)$$

$$\sum_i \delta R_{bikt} = \sum_c \delta MR_{bkct} \quad \forall b,k,t \quad (۲۱)$$

$$\sum_k \delta MR_{bkct} \leq DMR_{bct} \quad \forall b,c,t \quad (۲۲)$$

$$\delta S_{afst} \leq M \times \psi S_{afst} \quad \forall a,f,s,m,t \quad (۲۳)$$

$$\delta S_{afst} \leq M \times \psi M_m \quad \forall a,f,s,m,t \quad (۲۴)$$

$$\delta M_{bmit} \leq M \times \psi M_m \quad \forall b,m,i,t \quad (۲۵)$$

$$\delta M_{bmit} \leq M \times \psi D_i \quad \forall b,m,i,t \quad (۲۶)$$

$$\delta D_{bijt} \leq M \times \psi D_i \quad \forall b,i,j,t \quad (۲۷)$$

$$\delta_{bjit} \leq M \times \psi D_i \quad \forall b,j,i,t \quad (۲۸)$$

$$\delta R_{bikt} \leq M \times \psi D_i \quad \forall b,i,k,t \quad (۲۹)$$

$$\delta DS_{bint} \leq M \times \psi D_i \quad \forall b,i,n,t \quad (۳۰)$$

$$\delta R_{bikt} \leq M \times \psi R_k \quad \forall b,i,k,t \quad (۳۱)$$

$$\delta MR_{bkt} \leq M \times \psi R_k \quad \forall b, k, c, t \quad (32)$$

$$\delta DS_{bint} \leq M \times \psi DS_n \quad \forall b, i, n, t \quad (33)$$

مراکز توزیع به مراکز بازیافت به ترتیب در محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است. بالانس موجودی در مراکز بازیافت توسط محدودیت (۲۱) تضمین می‌گردد. به عبارت دیگر، میزان محصول ورودی به مراکز بازیافت باید با میزان محصولی که از مراکز بازیافت به بازار محصولات بازیافتی ارسال می‌گردد، برابر باشد. براساس محدودیت (۲۲)، در صورت تحویل هر محصول به بازار محصولات بازیافتی، نباید بیشتر از حداکثر تقاضای آن، به آن محصول تحویل داده شود. به عبارت دیگر، این امکان وجود دارد که به بازار محصول بازیافتی اصلاً محصولی تحویل داده نشود و یا کمتر از حداکثر تقاضای آن تحویل داده شود. شرط خرید ماده اولیه از تأمین‌کنندگان این است که با تأمین‌کننده مدنظر ارتباط گرفته شود که این شرط در محدودیت (۲۳) ارضا می‌گردد. براساس شروط مکان‌یابی، اگر مرکزی راه‌اندازی نشود، امکان ورود و خروج محصول به آن وجود نخواهد داشت که این شرط برای مراکز تولید در محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵) آورده شده است. شرط مکان‌یابی برای مراکز توزیع در محدودیت‌های (۲۶) تا (۳۰) آورده شده است. به عنوان مثال، محدودیت (۲۶) بیان می‌کند که شرط انتقال محصول از مرکز تولید به مرکز توزیع این است که مرکز توزیع راه‌اندازی شده باشد. همچنین محدودیت (۲۷) تضمین‌کننده این شرط است که اگر مرکز توزیعی راه‌اندازی نشد امکان خدمت‌دهی به خرده‌فروشان توسط آن مرکز توزیع وجود ندارد. اگر مرکز بازیافتی راه‌اندازی نشده باشد، امکان ورود و خروج محصول به آن وجود نخواهد داشت که این شرط به ترتیب در محدودیت‌های (۳۱) و (۳۲) آورده شده است. شرط ورود محصول به مراکز دورریز آن است که مرکز دورریز مدنظر راه‌اندازی شده باشد. این شرط در محدودیت (۳۳) در نظر گرفته شده است.

برای خطی‌سازی تابع هدف دوم، یک متغیر کمکی مثبت جدید ω تعریف کرده و با اضافه نمودن روابط (۳۴) تا (۳۷) به معادلات (۱) تا (۳۳) مدل مسئله خطی می‌شود.

$$\text{Max}_{b,j,t} \tau_{bj} \left(\frac{DRO_{bjt} + 4 \times DR_{bjt} + DRU_{bjt}}{6} - \sum_{b',i} \Omega_{b'ib} \delta D_{bjt} \right) = \omega \quad (34)$$

$$\text{Min } Z_2 = \omega \quad (35)$$

$$\omega \geq \tau_{bj} \left(\frac{DRO_{bjt} + 4 \times DR_{bjt} + DRU_{bjt}}{6} - \sum_{b',i} \Omega_{b'ib} \delta D_{bjt} \right) \quad \forall b, j, t \quad (36)$$

$$\omega \geq 0 \quad (37)$$

تابع هدف اول مسئله به کمینه‌سازی هزینه‌ها زنجیره می‌پردازد که به ترتیب شامل هزینه ارتباط با تأمین‌کنندگان، هزینه راه‌اندازی مراکز، هزینه حمل‌ونقل مواد اولیه و محصولات بین سطوح، هزینه خرید مواد اولیه از تأمین‌کنندگان، هزینه پردازش محصولات در مراکز و هزینه نگهداری محصولات در انبار مراکز توزیع است. همچنین درآمد حاصل از فروش محصولات بازیافتی در بازار محصولات بازیافتی از کل هزینه‌های زنجیره کسر می‌گردد. تابع هدف دوم به کمینه‌سازی بیشینه تقاضای ناراضی وزنی به ازای هر محصول در هر دوره زمانی می‌پردازد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد تقاضا در این تحقیق با سه پارامتر DRU_{bjt} و DR_{bjt} نشان داده شده است که به ترتیب حدود پایین، وسط و بالای فازی مثلثی هستند.

دسته اول محدودیت‌ها مربوط به محدودیت ظرفیت است. میزان ماده اولیه خریداری شده از هر تأمین‌کننده نباید از ظرفیت آن بیشتر باشد، که این محدودیت توسط محدودیت (۳) کنترل می‌گردد. عدم تجاوز از ظرفیت در مراکز تولید، مراکز توزیع در انتقال محصولات، مراکز توزیع در دریافت محصولات بازگشتی، مراکز بازیافت و مراکز دورریز به ترتیب در محدودیت‌های (۴) تا (۸) آورده شده است. دسته محدودیت‌های بعدی مربوط به محدودیت‌های تخفیف در خرید از تأمین‌کنندگان است. براساس محدودیت‌های (۹) و (۱۰)، تعیین می‌گردد که از هر تأمین‌کننده در کدام بازه و چه مقدار از کدام ماده اولیه خریداری می‌گردد. همچنین محدودیت (۱۱) بیان می‌کند که برای خرید هر ماده اولیه از هر تأمین‌کننده، حداکثر می‌توان از یک سطح قیمت استفاده کرد. بالانس موجودی در مراکز تولید در محدودیت (۱۲) آورده شده است. به عبارت دیگر، میزان ماده اولیه مورد نیاز که از تأمین‌کنندگان برای تولید محصولات خریداری می‌شود نباید از محصول تولیدشده ارسالی به مراکز توزیع کمتر باشد. بالانس موجودی در انبار توزیع‌کنندگان برای دوره‌ی زمانی اول و دوره‌های بعدی به ترتیب در محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴) آورده شده است. همچنین میزان محصول تحویلی به هر خرده‌فروش، میزان محصول برگشتی از خرده‌فروشان زمانی که دوره زمانی بزرگتر و کوچکتر از طول عمر محصول باشد، به ترتیب در محدودیت‌های (۱۵) تا (۱۷) آورده شده است. محدودیت (۱۸) حداکثر موجودی هر محصول در انبار هر توزیع‌کننده را در هر دوره زمانی با توجه به فسادپذیری محصول تعیین می‌نماید. بالانس موجودی در انبار مراکز توزیع و میزان محصول انتقالی از

۴- رویکرد حل

۴-۱- رویکرد تک‌هدفه کردن با تئوری فازی

انتخاب روش مناسب برای حل مدل‌های چندهدفه، فرآیند بسیار مهمی است که عدم انتخاب صحیح می‌تواند منجر به ارایه نتایج نامطلوب گردد. روش‌های مختلفی برای این منظور وجود دارد که هر کدام از آن‌ها مزایا و معایبی دارند. روش‌های مبتنی بر تئوری فازی، اجازه می‌دهد که علاوه بر تک‌هدفه نمودن، عدم قطعیت نیز در مدل وارد گردد. بر این اساس، در ادامه یک رویکرد مبتنی بر تئوری فازی برگرفته شده از روش ترابی و هسینی (Torabi and Hassini, 2009) برای تک‌هدفه نمودن تحت شرایط عدم قطعیت گام به گام ذکر شده است.

گام اول: در این گام حدود بالا و پایین هر تابع هدف تعیین می‌گردد. برای این منظور، مدل به ازای هر یک از توابع هدف به طور جداگانه اجرا می‌گردد و مقدار بهینه تابع هدف مدنظر و مقادیر شدنی برای سایر توابع هدف ذخیره می‌شود و این عمل برای تمامی توابع هدف تکرار می‌گردد. به ازای تابع هدف h ام، کوچکترین و بزرگترین مقدار به ترتیب به عنوان حدود پایین و بالای آن تابع هدف در نظر گرفته شده و با نماد Z_h^P و Z_h^N نمایش داده می‌شود.

گام دوم: در این گام با استفاده از حدود تعیین شده در گام قبل، توابع عضویت فازی را برای هر یک از توابع هدف با استفاده از روابط زیر توسعه داده می‌شود. برای توابع بیشینه‌سازی:

$$\mu_{Z_h}^{Max} = \frac{Z_h - Z_h^N}{Z_h^P - Z_h^N}$$

برای توابع کمینه‌سازی:

$$\mu_{Z_h}^{Min} = \frac{Z_h^P - Z_h}{Z_h^P - Z_h^N}$$

گام سوم: در این گام با استفاده از نمادهای زیر، و همچنین مدل ریاضی ارائه شده توسط ترابی و هسینی (Torabi and Hassini, 2009) ریاضی تک‌هدفه می‌گردد.

مدل ریاضی

(۳۸)

$$Max \hat{\gamma} \times \lambda_0 + (1 - \hat{\gamma}) \times \sum_h w_h \times (\mu_{Z_h}^{Max} + \mu_{Z_h}^{Min})$$

St :

$$\lambda_0 \leq \mu_{Z_h}^{Max}$$

$$\lambda_0 \leq \mu_{Z_h}^{Min}$$

$$\sum_h w_h = 1$$

در معادلات بالا، $\hat{\gamma}$ ارزش حداقل درجه رضایتمندی توابع هدف، λ_0 حداقل درجه رضایتمندی توابع هدف، w_h وزن اهمیت نسبی درجه رضایتمندی h امین تابع هدف و در نهایت $\mu_{Z_h}^{Min}$ و $\mu_{Z_h}^{Max}$ به ترتیب درجه رضایتمندی برای تابع هدف h بر حسب این‌که از نوع کمینه‌سازی و یا بیشینه‌سازی هستند، می‌باشد. با استفاده از معادلات بالا مدل پیشنهادی تک‌هدفه می‌گردد.

۵- نتایج محاسباتی و تحلیل حساسیت

۵-۱- تنظیم پارامترها

در این بخش نمونه مسائلی در اندازه‌های مختلف تولید شدند و مدل پیشنهادی به ازای مسائل تولید شده در نرم‌افزار تجاری گمز اجرا شدند. برای تولید داده‌ها از فرآیند تولید عدد تصادفی که از تابع یکنواخت پیوسته می‌باشد بهره گرفته شد. در فرآیند تنظیم داده‌ها، مقاردهی به برخی از پارامترها، در گرو مقادیر سایر پارامترها است تا همواره فضای جواب مسئله موجه باشد. در ادامه در جدول ۲ فرآیند تنظیم داده‌ها برای مقاردهی به پارامترهای مدل پیشنهادی آورده شده است. در جدول ۲، *Uniform* نشان‌دهنده‌ی تابع توزیع یکنواخت پیوسته و *Round* تابعی برای گرد کردن داده‌های تولید شده می‌باشد.

جدول ۱. فرآیند تنظیم پارامترها

OC_{st}	$Round(Uniform(5 \times 10^6, 6 \times 10^6))$	MC_m	$Round(Uniform(4 \times 10^8, 5 \times 10^8))$
DC_i	$Round(Uniform(1.5 \times 10^8, 2 \times 10^8))$	RC_k	$Round(Uniform(1 \times 10^8, 1.4 \times 10^8))$
DSC_n	$Round(Uniform(7 \times 10^{7.9}, 10^7))$	DR_{bit}	$Round(Uniform(2 \times 10^3, 2.3 \times 10^3))$

ξ_{ab}	$Round(Uniform(8 \times 10^{-1}, 9 \times 10^{-1}))$	CaS_{ast}	$Round\left(Uniform(2.5, 3.5) \times \frac{\sum_{b,j} DR_{bjt} \times \xi_{ab}}{A \times S}\right)$
VL_b	$Round(Uniform(9 \times 10^{-1}, 9.5 \times 10^{-1}))$	CaM_{bmt}	$Round\left(Uniform(2.5, 3.5) \times \frac{\sum_j DR_{bjt}}{M}\right)$
CaR_{bit}	$Round\left(Uniform(2.5, 3.5) \times \frac{\sum_j DR_{bjt}}{I}\right)$	CaD'_{bit}	$Round(Uniform(1 \times 10^{-1}, 1.5 \times 10^{-1}) \times CaR_{bit})$
CaR_{bkt}	$Round\left(\frac{\sum_i CaD'_{bit}}{K}\right)$	PrM_{bmt}	$Round(Uniform(7 \times 10^3, 7.7 \times 10^3))$
DMR_{bct}	$Round(Uniform(2.5 \times 10^2, 3 \times 10^2))$	PrD'_{bit}	$Round(Uniform(6.5 \times 10^2, 8 \times 10^2))$
η'_{bi}	$Uniform(7.5 \times 10^{-1}, 8.5 \times 10^{-1})$	$PrDS_{bn}$	$Round(Uniform(3 \times 10^2, 4 \times 10^2))$
PrD_{bit}	$Round(Uniform(1.1 \times 10^3, 1.4 \times 10^3))$	PH_{bit}	$Round(U(4.5 \times 10^2, 5.5 \times 10^2))$
PrR_{bkt}	$Round(Uniform(1.3 \times 10^3, 1.6 \times 10^3))$	DL_{afst}	$\begin{aligned} & \text{if } f = 1 \rightarrow DL_{afst} = 0 \\ & \text{if } f > 1 \rightarrow DL_{afst} = \frac{(f-1) \times J \times 0.5 \times 2300}{F} \end{aligned}$
PCM_{bct}	$Round(Uniform(1.8 \times 10^3, 2 \times 10^3))$	α_b	این پارامتر متناسب با دوره زمانی تعیین می‌شود و همواره کوچکتر یا مساوی نصف آخرین دوره زمانی در نظر گرفته شده است.
DU_{afst}	$DU_{afst} = \frac{f \times J \times 0.5 \times 2300}{F}$	PrS_{afst}	$\begin{aligned} & \text{if } f = 1 \rightarrow PrS_{afst} = Round(Uniform(1.5 \times 10^4, 1.65 \times 10^4)) \\ & \text{if } f > 1 \rightarrow PrS_{afst} = Round(0.96 \times PrS_{a(f-1)st}) \end{aligned}$
η_{bjt}	$Uniform(5 \times 10^{-2}, 1.5 \times 10^{-1})$	$CaDS_{rt}$	$Round\left(Uniform(1.5 \times 10^{-1}, 2 \times 10^{-1}) \times \frac{\sum_{b,k} CaR_{bkt} \times VL_b}{N}\right)$
$TrSM_{asmt}, TrMD_{bmit}, TrRD'_{bjt}, TrRD_{bjt}, TrDR_{bikt}, TrDD_{bint}, TrR_{bkt}$		$Round(Uniform(5 \times 10^2, 6 \times 10^2))$	

۲-۵- نتایج عددی

جداگانه آورده شده است. لازم به ذکر است که ضریب تابع هدف اول (W_1) و دوم (W_2) به ترتیب ۰,۷۵ و ۰,۲۵ در نظر گرفته شده است. همچنین در این جدول زمان اجرای مدل در نرم‌افزار برای هر مسئله به تفکیک آورده شده است. در ادامه به منظور بررسی رفتار مدل پیشنهادی، با استفاده از تغییر در ضرایب توابع هدف نمودار مرز پارتو معرفی شده است و با تغییر در مقادیر تقاضا و تغییر در درصد محصولات قابل بازیافت، فرآیند تحلیل حساسیت صورت گرفت.

۲-۵-۱- مرز پارتو ضرایب توابع هدف

در این بخش به فرآیند رسم مرز پارتو با استفاده از تغییر در ضرایب توابع هدف پرداخته خواهد شد. انتظار می‌رود که با افزایش ضریب یک تابع هدف، مقدار آن تابع هدف بدتر نشود و با کاهش ضریب یک تابع هدف، مقدار آن تابع هدف بهتر نشود. منظور از عبارت "بدتر نشود" در مسایل کمینه‌سازی این است

در این بخش به منظور بررسی کارایی مدل پیشنهادی و عملکرد آن در مسائلی با ابعاد گوناگون، تعداد ۱۲ نمونه مسئله در ابعاد مختلف تولید شد. مشخصات ۱۲ نمونه مسئله تولید شده در جدول ۳ نشان داده شده است. این نمونه مسائل با استفاده از نرم‌افزار تجاری گمز نسخه ۲,۱,۲۴ و سالور سیپلکس بر روی یک لپ‌تاب ۷ هسته‌ای و رم ۸ گیگابایت حل گردید. حداکثر زمان قابل قبول برای دستیابی به جواب در نرم‌افزار گمز ۷۲۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از حل این نمونه مسائل در جدول ۴ خلاصه شده است. براساس مسائل تصادفی تولید شده مطابق با جدول ۳، مقادیر اندیس‌ها به فرآیند تنظیم پارامترها داده شد و این امر منجر به تولید مجموعه داده‌ها گردید. سپس با استفاده از داده‌های تولید شده و فرآیند تک‌هدفه کردن، مدل پیشنهادی تک‌هدفه شد و با اجرای آن در نرم‌افزار گمز، مقدار بهینه توابع هدف و متغیرهای تصمیم محاسبه گردید. در ادامه در جدول ۴، مقدار بهینه توابع هدف برای هر یک از مسائل به طور

این تابع هدف افزایش یافت و با افزایش ضریب تابع هدف مقدار این تابع هدف یا کاهش یافت و یا ثابت ماند که نتایج حاصل از آن دقیقاً منطبق بر انتظار منطقی از اجرای مدل بود.

۵-۲-۲- تحلیل حساسیت مقادیر تقاضا

در این بخش با تغییر در مقادیر تقاضا، رفتار مدل پیشنهادی مورد سنجش قرار گرفت. انتظار می‌رود که با افزایش مقدار تقاضا، مقدار تابع هدف اول افزایش یابد و با کاهش آن مقدار تابع هدف مذکور کاهش یابد. همچنین انتظار می‌رود که با افزایش مقدار تقاضا، امکان مواجهه با کمبود بیشتر شود و با کاهش آن امکان مواجهه با کمبود کاهش یابد.

در جدول ۶ سناریوهای مبتنی بر تغییر در مقادیر تقاضا و مقدار بهینه توابع هدف به ازای هر سناریو آورده شده است. همچنین روند تغییرات توابع هدف اول و دوم به ازای سناریوهای ناشی از تغییر در مقادیر تقاضا به ترتیب در شکل ۵ و ۶ آورده شده است.

که مقدار تابع هدف یا ثابت می‌ماند و یا کمتر می‌شود و در مسائل بیشینه‌سازی، یا ثابت می‌ماند و یا افزایش می‌یابد. همچنین منظور از عبارت "بهرتر نشود" در مسائل کمینه‌سازی این است که یا ثابت می‌ماند و یا افزایش می‌یابد و در مسائل بیشینه‌سازی، یا ثابت می‌ماند و یا کاهش می‌یابد. در ادامه، در جدول ۵ تعداد ۶ سناریو با تغییر در ضرایب توابع هدف ایجاد شده است و مقدار بهینه توابع هدف براساس این ۶ سناریو آورده شده است. همچنین در شکل ۲ و ۳ روند تغییرات توابع هدف به ازای این ۶ سناریو ترسیم شده است. همچنین مرز پارتوی حاصل از هر دو تابع هدف به صورت همزمان به ازای هر سناریو در شکل ۴ نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت ضرایب توابع هدف که در جدول ۵ و شکل ۲ تا ۴ نشان داده شده است، با افزایش ضریب تابع هدف اول (w_1)، مقدار آن کاهش یافت و با کاهش ضریب آن مقدار تابع هدف افزایش یافت. همچنین در تابع هدف دوم نیز با کاهش ضریب آن (w_2)، مقدار

جدول ۳. مشخصات نمونه مسائل تصادفی تولید شده

t	f	C	n	k	j	i	b	a	m	S	مسئله
2	2	2	2	2	3	2	2	1	2	2	M1
3	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	M2
3	2	3	2	2	4	3	2	2	2	3	M3
4	2	3	2	3	5	3	3	2	3	3	M4
4	3	3	3	3	6	4	3	3	3	4	M5
5	3	4	3	3	6	4	3	4	4	4	M6
5	3	4	3	4	7	4	4	4	4	4	M7
6	3	5	4	5	8	5	4	5	5	5	M8
7	4	5	4	5	9	5	4	6	5	6	M9
8	4	5	4	5	10	5	4	6	5	6	M10
8	4	5	5	6	10	5	5	6	6	7	M11
9	5	6	5	7	11	6	6	7	6	7	M12

همان‌طور که در جدول ۶ قابل مشاهده است و در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است، با افزایش مقدار تقاضا مقدار هر دو تابع هدف افزایش و با کاهش آن مقدار هر دو تابع هدف کاهش یافته است که این یافته‌ها نیز دقیقاً منطبق بر انتظارات بود و نشان‌دهنده صحت رفتار مدل پیشنهادی است.

۵-۲-۳- تحلیل حساسیت درصد محصولات قابل بازیافت

به عنوان سومین راهکار برای بررسی عملکرد مدل پیشنهادی، سناریوهایی مبتنی بر تغییر در درصد محصولات بازیافتی تعریف می‌شود. انتظار می‌رود که در حالتی که مرکز جدیدی، راه‌اندازی یا بسته نشود، با افزایش ضریب پارامتر n'_{bi} ، مقدار تابع هدف اول افزایش یابد چرا که در مسئله مورد بررسی هزینه انهدام

جدول ۴. مقادیر بهینه‌ی توابع هدف

مسئله	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	زمان اجرا (ثانیه)
M1	1439651714	0	8.984
M2	1866294993	0	9.45
M3	1323222246	0	11.092
M4	28283675034	118.26	10.031
M5	61660206753	221.04	34.294
M6	7634718532	100.24	68.215
M7	55499844343	154.41	341.867
M8	13887804453	0	808.781
M9	39853508748	0	1238.443
M10	206199783546	346.26	1581.94
M11	335755166226	536.56	3099.71
M12	198196487208	106.41	6627.512

همچنین روند تغییرات تابع هدف اول نیز در شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با افزایش درصد محصولات بازیافتی، مقدار تابع هدف اول افزایش یافته و با کاهش ضریب مقدار آن کاهش یافته است که این نتایج نیز منطبق بر انتظارات بود. لازم به ذکر است که با افزایش درصد محصولات بازیافتی تا آخرین سناریو، حداکثر دو مرکز بازیافت راه‌اندازی می‌گردد و مدل تصمیم به اضافه کردن مرکز بازیافت جدید نکرده است. اما با کاهش درصد محصولات بازیافتی، در سناریو شماره دو (S2) مدل تصمیم به بستن یکی از دو مرکز بازیافت نموده است و تنها با مرکز بازیافت ۲ کار می‌کند. بنابراین نتایج حاصل از این بخش مؤید رفتار قابل قبول مدل پیشنهادی است و حاکی از کارایی و اثربخشی آن است.

محصولات از اختلاف درآمد حاصل از محصولات بازیافتی و هزینه بازیافت محصولات کمتر است. همچنین با استدلال مشابه انتظار می‌رود که با کاهش ضریب پارامتر n'_{bi} مقدار تابع هدف اول کاهش یابد. اما همان‌طور که بیان شد، این در شرایطی است که هیچ مرکز بازیافت یا دورریز در لجستیک معکوس کم یا زیاد نشود (البته به دلیل این‌که کل هزینه‌های زنجیره عددی بسیار بزرگ در مقایسه با هزینه‌های راه‌اندازی مراکز بازیافت و دورریز است، انتظار می‌رود که انتظار بیان شده همواره برقرار باشد). برای این منظور در ادامه سناریوهایی مبتنی بر تغییر در درصد محصولات بازیافتی تعریف می‌گردد و رفتار مدل به ازای این سناریوها مورد سنجش قرار می‌گیرد. سناریوهای مذکور و نتایج حاصل از اجرای هر سناریو در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۵. نتایج تغییرات ضرایب توابع هدف

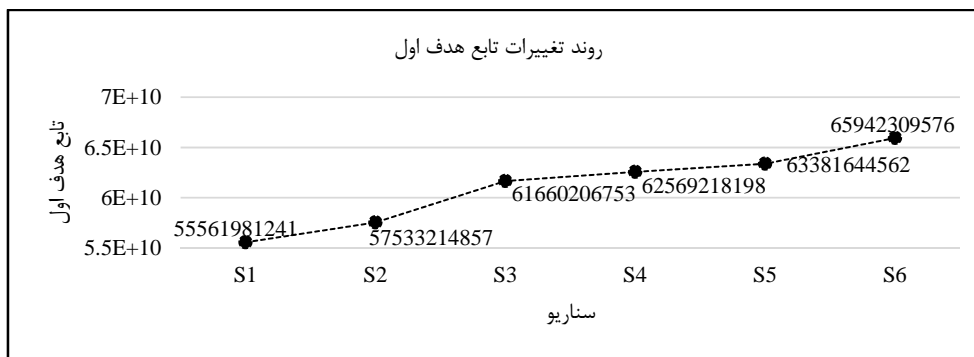
تابع هدف دوم	تابع هدف اول	w_2	w_1	سناریو
240.66	55561981241	0.15	0.85	S1
227.07	57533214857	0.2	0.8	S2
221.04	61660206753	0.25	0.75	S3
220.07	62569218198	0.3	0.7	S4
217.33	63381644562	0.35	0.65	S5
217.33	65942309576	0.4	0.6	S6

جدول ۷. نتایج تحلیل حساسیت درصد محصولات بازیافتی

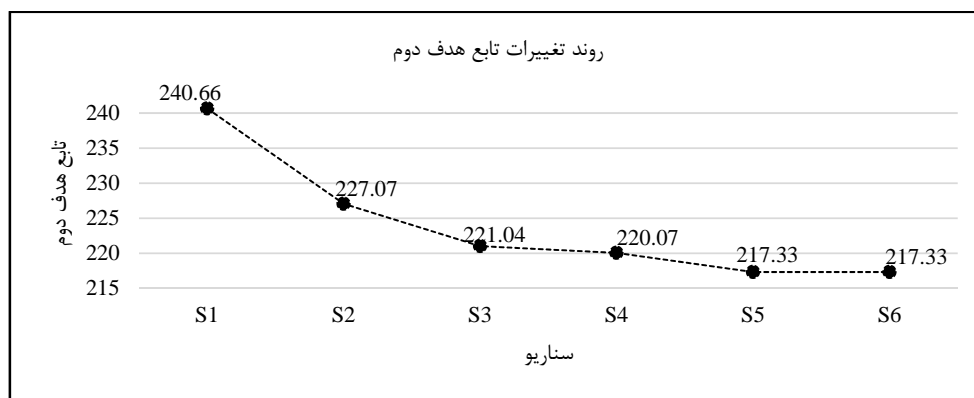
تابع هدف اول	تقاضا	سناریو
14526392610	$0.8 \times n'_{bi}$	S1
20365124263	$0.85 \times n'_{bi}$	S2
32244580051	$0.9 \times n'_{bi}$	S3
43670521467	$0.95 \times n'_{bi}$	S4
61660206753	n'_{bi}	S5
72989061593	$1.05 \times n'_{bi}$	S6
85575132350	$1.1 \times n'_{bi}$	S7
96459811148	$1.15 \times n'_{bi}$	S8

جدول ۶. نتایج تحلیل حساسیت مقادیر تقاضا

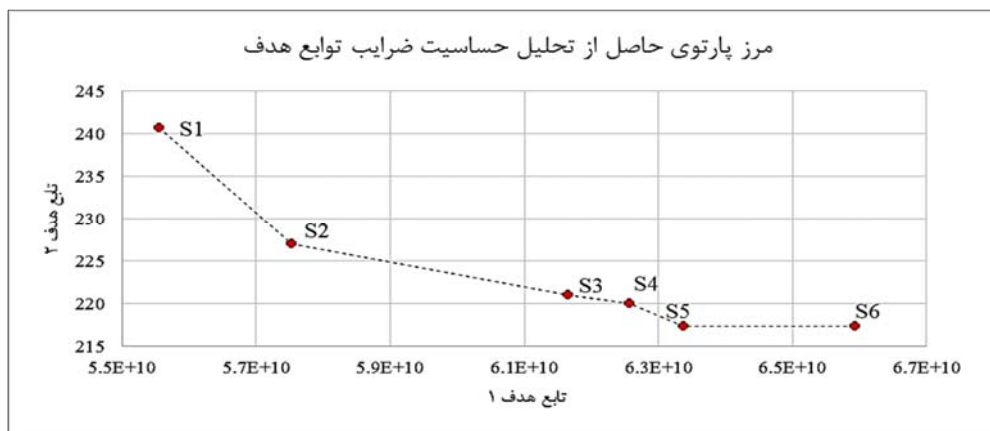
تابع هدف دوم	تابع هدف اول	تقاضا	سناریو
0	1744088454	$0.7 \times (DRO_{bjt}, DR_{bjt}, DRU_{bjt})$	S1
24.46	4230093155	$0.8 \times (DRO_{bjt}, DR_{bjt}, DRU_{bjt})$	S2
118.24	20960114446	$0.9 \times (DRO_{bjt}, DR_{bjt}, DRU_{bjt})$	S3
221.04	61660206753	$(DRO_{bjt}, DR_{bjt}, DRU_{bjt})$	S4
339.79	107708956541	$1.1 \times (DRO_{bjt}, DR_{bjt}, DRU_{bjt})$	S5
448.91	160036622801	$1.2 \times (DRO_{bjt}, DR_{bjt}, DRU_{bjt})$	S6
565.59	212722516176	$1.3 \times (DRO_{bjt}, DR_{bjt}, DRU_{bjt})$	S7
693.63	271301079249	$1.4 \times (DRO_{bjt}, DR_{bjt}, DRU_{bjt})$	S8



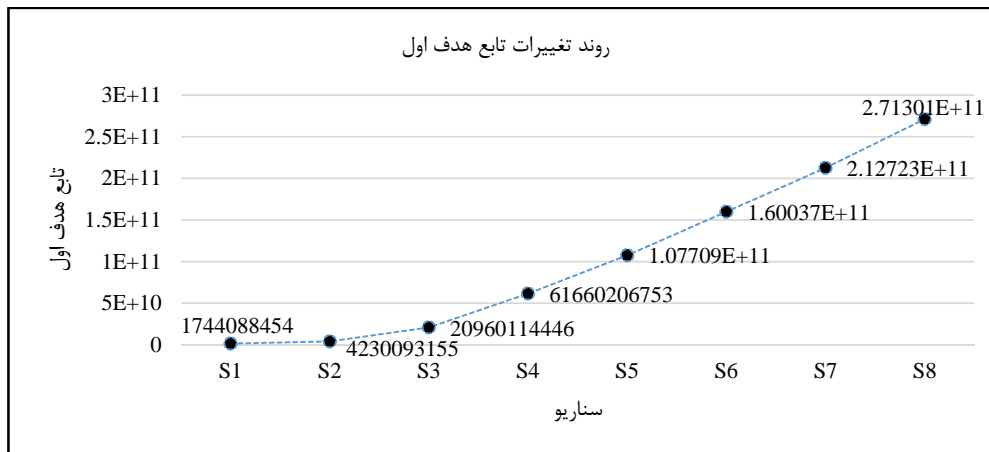
شکل ۲. روند تغییرات تابع هدف اول به ازای تغییرات ضرایب تابع هدف اول



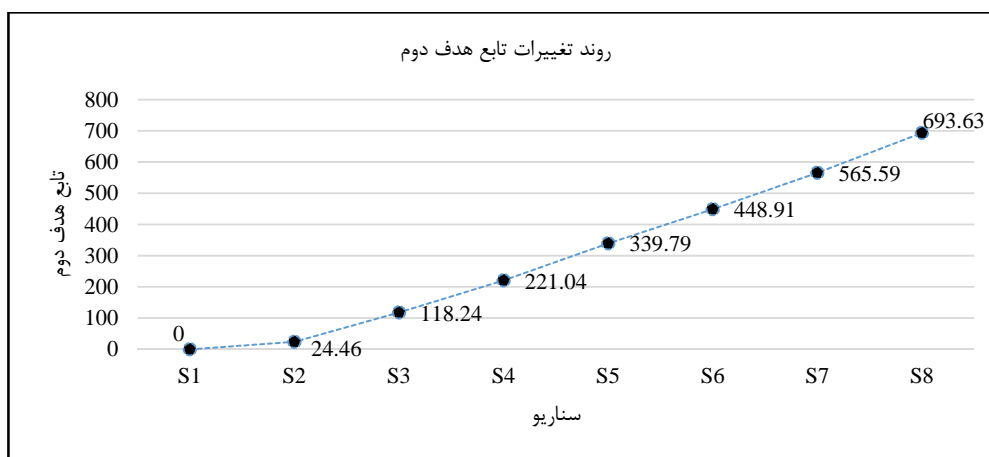
شکل ۳. روند تغییرات تابع هدف اول به ازای تغییرات ضرایب تابع هدف دوم



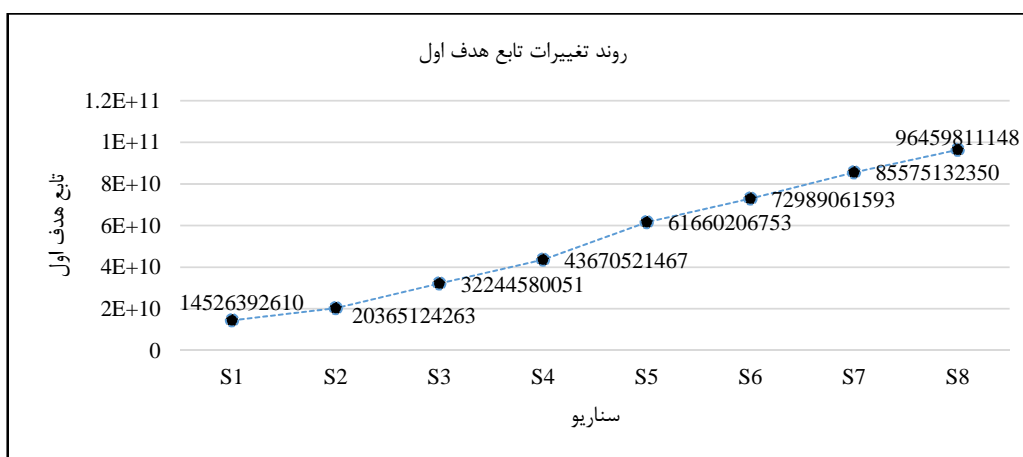
شکل ۴. مرز پارتوی حاصل از تغییرات ضرایب توابع هدف



شکل ۵. روند تغییرات تابع هدف اول به ازای تحلیل حساسیت مقادیر تقاضا



شکل ۶. روند تغییرات تابع هدف دوم به ازای تغییر مقادیر تقاضا



شکل ۷. روند تغییرات تابع هدف اول به ازای تغییر درصد محصولات بازیافتی

۶- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، مطالعه یک PSCNDP چندمحصولی، چنددوره‌ای که شامل چندین تأمین‌کننده، چندین تولیدکننده بالقوه، چندین توزیع‌کننده بالقوه، چندین خرده‌فروشان، چندین مرکز بازیافت بالقوه، چندین مرکز دورریز بالقوه و همچنین بازار محصولات بازیافتی است. یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط دودهدفه جدید برای شبکه زنجیره تأمین دارویی طراحی شده تحت شرایط عدم قطعیت پیشنهاد شده است. برای نزدیکتر شدن مدل به دنیای واقعی، علاوه بر امکان فاسدشدن داروها، امکان جایگزینی آنها و همچنین امکان انبارش آنها برای دوره‌های آتی در انبار مراکز توزیع در نظر گرفته شده است. همچنین تخصیص تأمین‌کننده با استفاده از سیاست‌های تخفیف و تخصیص بازار محصولات بازیافتی (ثانویه)، از دیگر تصمیمات کلیدی و کاربردی مدل پیشنهادی است. مدل پیشنهادی به کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره شامل هزینه‌های راه‌اندازی مراکز، هزینه ارتباط با تأمین‌کنندگان، هزینه خرید مواد خام از تأمین‌کنندگان، هزینه حمل و نقل مواد خام و محصولات بین سطوح، هزینه انبارش محصولات در انبار مراکز توزیع، هزینه مواجهه با کمبود و هزینه پردازش محصولات در مراکز می‌پردازد و درآمد حاصل از فروش محصولات بازیافتی از هزینه‌ها کسر می‌گردد. علاوه بر این، در تابع هدف دوم به کمینه‌سازی بیشینه کمبود پرداخته می‌شود. مدل اولیه، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط دودهدفه بود و با استفاده از تکنیک‌های ریاضی خطی‌سازی گردید. نتایج بدست آمده از نرم‌افزار تجاری گمز برای حل ۱۲ نمونه مسئله تولید شده در ابعاد مختلف، نشان از کارایی مدل خطی‌شده پیشنهادی دارد. در نهایت با تغییر ضرایب تابع هدف، مقادیر تقاضا و درصد محصولات قابل بازیافت به تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی پرداخته شد. با استفاده از تغییر در ضرایب توابع هدف نمودار مرز پارتو در مسئله، معرفی شد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در مقادیر تقاضا نشان داد که با افزایش (یا کاهش) تقاضا تابع هدف اول و دوم نیز افزایش (یا کاهش) می‌یابد. تحلیل حساسیت درصد محصولات بازیافتی نشان داد که تابع هدف اول با افزایش درصد محصولات بازیافتی، افزایش می‌یابد و افزایش درصد محصولات بازیافتی در تابع هدف دوم تأثیری ندارد. برای تحقیقات آتی موارد زیر پیشنهاد می‌گردد.

- استفاده از سایر تکنیک‌های حل مسئله در شرایط عدم قطعیت

مانند روش سناریو محور.

- استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری توسعه یافته برای حل مسئله در ابعاد بسیار بزرگ.
- اضافه نمودن انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش به مسئله.
- در نظر گرفتن موضوعات زیست‌محیطی مانند کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از راه‌اندازی مراکز و حمل و نقل محصولات و یا همراه با موضوعات اجتماعی مانند توجه به اشتغال‌زایی، توسعه‌یافتگی و حقوق سهامداران و کارکنان، که منجر به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز یا پایدار برای محصولات دارویی فاسدشدنی گردد.

۷- مراجع

- جمشیدی، سمانه و بویرحسینی، امید (۱۳۹۸). توسعه یک مدل ریاضی مکان‌یابی تسهیلات زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با در نظر گرفتن اثر یادگیری. *پژوهشنامه حمل و نقل*، دوره ۱۶، شماره ۲، ۱۰۵-۹۱.
- فرقانی، محسن، وحدت زاد، محمدعلی. و صادقیه، احمد (۱۳۹۷). مدل‌سازی ریاضی و ارائه یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت برای مسئله مسیریابی - موجودی چندمحصولی، چندوسیله‌ای همراه با جریان معکوس. *پژوهشنامه حمل و نقل*، سال ۱۵، شماره ۱، ۱۹۴-۱۷۷.
- عطائی، اسفندیار، صادقیان، رامین و حامدی، مریم (۱۳۹۸). ارائه یک مدل چندهدفه جهت مکان‌یابی مراکز توزیع و مسیریابی خودروهایی توزیع خون در شرایط بحران. *پژوهشنامه حمل و نقل*، سال ۱۶، شماره ۴، ۱۶۴-۱۴۷.
- Ghodratnama, A., Hassannia, R., & Mirzazadeh, A., (2017). A fuzzy goal programming approach to solve a novel supply chain multi-objective mathematical model under uncertainty. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, Vol. 9, 280-314.
- Goodarzian, F., Hosseini-Nasab, H., Muñozuri, J. and Fakhrazad, M.B., (2020). A multi-objective pharmaceutical supply chain network based on a robust fuzzy model: A comparison of meta-heuristics. *Applied Soft Computing*, Vol. 92, 106331.

- Sazvar, Z., Zokaee, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Salari, S.A.S. and Nayeri, S., (2021). Designing a sustainable closed-loop pharmaceutical supply chain in a competitive market considering demand uncertainty, manufacturer's brand and waste management, *Annals of Operations Research*, 1-32.
- Singh, S.K. and Goh, M., (2019). Multi-objective mixed integer programming and an application in a pharmaceutical supply chain. *International Journal of Production Research*, Vol. 57, 1214-1237.
- Taleizadeh, A. A., Haji-Sami, E. and Noori-daryan, M., (2020). A robust optimization model for coordinating pharmaceutical reverse supply chains under return strategies. *Annals of Operations Research*, Vol. 291, 875-896.
- Torabi, S. A., and Hassini, E., (2009). Multi-site production planning integrating procurement and distribution plans in multi-echelon supply chains: an interactive fuzzy goal programming approach. *International Journal of Production Research*, Vol. 47, 5475-5499.
- Habibi-Kouchaksaraei, M., Paydar, M. M., & Asadi-Gangraj, E., (2018). Designing a bi-objective multi-echelon robust blood supply chain in a disaster. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 55, 583-599.
- Micheli, G. J., & Mantella, F., (2018). Modelling an environmentally-extended inventory routing problem with demand uncertainty and a heterogeneous fleet under carbon control policies. *International Journal of Production Economics*, Vol. 204, 316-327.
- Rafie-Majd, Z., Pasandideh, S.H.R. and Naderi, B., (2018). Modelling and solving the integrated inventory-location-routing problem in a multi-period and multi-perishable product supply chain with uncertainty: Lagrangian relaxation algorithm. *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 109, 9-22.
- Roshan, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Rahimi, Y., (2019). A two-stage approach to agile pharmaceutical supply chain management with product substitutability in crises. *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 127, 200-217.
- Saha, E. and Ray, P.K., (2019). Modelling and analysis of inventory management systems in healthcare: A review and reflections. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 137, 106051.
- Savadkoobi, E., Mousazadeh, M. and Torabi, S.A., (2018). A possibilistic location-inventory model for multi-period perishable pharmaceutical supply chain network design. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 138, 490-505.

Design of a Pharmaceutical Supply Chain under Uncertainty and Reverse Logistic

Daniyal Foroughi, Department of Industrial Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Hamidreza Kia, Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: Hamid.R.Kia@iau.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

The design of supply chain networks has always been important from the point of view of artisan and decision makers. The optimization of supply chain network becomes more important with the advent of the supply chain of perishable goods, especially perishable drugs, because inventory management is one of the vital decisions in this supply chain to prevent spoilage and shortage of drugs. In this paper, a new bi-objective mixed integer nonlinear programming with forward and reverse logistic simultaneously is represented to manage the production of perishable drugs as well as their distribution. This multi-echelon supply chain includes suppliers, potential production centers, potential distribution centers, potential recycling centers, potential disposal centers and recycled product markets along with multi-period and multi-product assumptions. Considering discounts on purchasing from suppliers, warehousing in distribution centers, uncertainty in demand and the use of alternative goods to avoid shortages in order to meet the social criteria are among the contribution of this study. To solve the proposed bi-objective nonlinear model including minimizing the total costs of the chain and minimizing the maximum shortage, the linearization technique and transmission bi-objective model to single-objective model were used under the fuzzy uncertainty conditions. After validating the proposed model, 12 instances were randomly generated in different dimensions to measure the efficiency of the model and solved in GAMS software. The efficiency of the proposed model is shown in the obtained Pareto set for a particular instance. The results of sensitivity analysis show that with increasing the percentage of recycled products, the first objective function has increased and the second objective function has not change. This paper can help the managers benefit from reverse logistics, recycling of perishable products and paying attention to social criteria in order to gain a competitive privilege throughout the drug supply.

Keywords: Supply Chain Network Design, Uncertainty; Reverse Logistic, Perishable Goods