مدل ریاضی چند هدفه برای مساله تولید- موجودی- مسیریابی دو مرحله‌ای محصولات دارویی

نرجس سلم‌آبادی، کارشناس ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

محمدعلی بهشتی‌نیا (نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

E-mail: beheshtinia@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹٦/۰٦/۲۵ پذیرش: ۱۳۹۷/۰٤/۱۰

چکیده

زنجیره تأمین دارو بخشی از سیستم سلامت است که اهمیت بسزایی در افزایش سلامت جامعه دارد و از این رو یک مساله حیاتی و اساسی در هر کشور است. در این مقاله سعی شده است با بررسی مساله یکپارچه تولید-موجودی-مسیریابی با یکی از مهم‌ترین چالش‌های حال حاضر صنعت دارو، یعنی عدم هماهنگی بین بخش‌های مختلف زنجیره، مقابله شود. مساله مورد بررسی دارای دو تابع هدف است که تابع هدف اول آن کمینه‌سازی هزینه‌های کل سیستم شامل هزینه‌های ثابت و متغیر تولید، انتقال دارو بین سطوح مختلف، نگهداری و فساد محصولات و تابع هدف دوم کمینه‌سازی تاثیرات زیست محیطی ناشی از تولید و انتقال داروها است. بعلاوه در این مساله، حالت تولید توسط چند تولیدکننده مختلف و توزیع دومرحله‌ای نیز در نظر گرفته شده‌اند. پس از ارایه مدل ریاضی مساله مذکور، به منظور مقابله با تغییرات تقاضا از رویکرد تصادفی سناریو محور به منظور مدلسازی استفاده می‌شود. همچنین مدل مذکور در شرکت داروسازی بایرپل فناور پیاده‌سازی و نتایج تحلیل و بررسی می‌شود. نتایج نشان داد که افزایش تقاضا موجب افزایش هر دو تابع هدف مساله می‌شود. در انتها نیز روی دو پارامتر مساله تحلیل حساسیت انجام می‌شود. همچنین افزایش هزینه های راه اندازی موجب افزایش تابع هدف هزینه و کاهش تابع هدف انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تامین، حمل و نقل، برنامه‌ریزی تصادفی، برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای و مسئله تولید- مسیریابی

۱. مقدمه

زنجیره تأمین دارو بخشی از سیستم سلامت است که اگر به درستی به آن توجه نشود بعید است مفهوم سلامت در آن جامعه رشد قابل توجهی را تجربه کند. برخلاف تمام پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه روش‌های تولید، ذخیره‌سازی و توزیع، بسیاری از شرکت‌های دارویی به طور قابل ملاحظه‌ای از پاسخگویی موثر به تقاضاهای موجود بازار فاصله دارند [Masoumi, Yu and Nagurney, 2012, Papageorgiou, 2009, Shah, 2004].

مدیریت زنجیره تامین شامل ایجاد یکپارچگی و هماهنگی بین اجزای زنجیره تامین با هدف افزایش رقابت‌پذیری آن است. عملکرد مناسب زنجیره تامین دارو مستلزم هماهنگی بین بخشهای مختلف زنجیره شامل تولید، موجودی و توزیع است.

این تحقیق به برنامه‌ریزی یکپارچه تولید-موجودی-مسیریابی در زنجیره تامین دارو با هدف کمینه‌سازی همزمان دو تابع هدف مجموع هزینه‌ها (شامل هزینه‌های ثابت و متغیر تولید، حمل و نقل، نگهداری موجودی و فساد دارو) و مجموع گازهای گلخانه‌ای منتشر شده هنگام تولید محصولات و حرکت وسایل نقلیه می‌پردازد. ویژگی‌های اصلی مساله مورد بررسی شامل موارد زیر است:

برنامه‌ریزی یکپارچه تولید-موجودی-مسیریابی: برنامه‌ریزی جداگانه و سلسله مراتبی تصمیمات مرتبط با تولید، کنترل موجودی و حمل و نقل لزوما منجر به رسیدن به بهینه عمومی نمی‌شود. از این رو در این تحقیق سعی شده است تصمیم‌ها به‌صورت یکپارچه اتخاذ شوند تا هماهنگی بین اجزا بیشتر شود.

حالت وجود چند تولیدکننده: معمولا شرکتهای توزیع دارو، داروهای مورد نیاز داروخانه‌ها و بیمارستانها را از تولیدکننده‌های مختلف جمع‌آوری کرده و سپس به داروخانه‌های مرتبط تحویل می‌دهند. بنابراین در زنجیره تامین مورد بررسی حالت تولید توسط چند تولیدکننده مختلف در نظر گرفته شده است.

سیستم حمل و نقل دو مرحله‌ای: به دلایل مختلف از جمله امکان حمل بخشی از مسیرها با وسایل نقلیه اقتصادی، عدم قابلیت نگهداری بیش از حد کالاها در داروخانه‌ها و اینکه معمولا در صنعت دارو شرکتهای توزیع کننده (و نه شرکتهای سازنده) اقدام به انتقال محصولات به داروخانه‌ها می‌کنند، در این مقاله سیستم حمل و نقل به صورت دو مرحله‌ای در نظر گرفته شده است که مرحله اول شامل انتقال کالاها از تولید کننده به مراکز توزیع و مرحله دو از مراکز توزیع به داروخانه ها می‌شود.

اضافه نمودن تابع هدف کمینه‌سازی مجموع گازهای گلخانه‌ای منتشر شده (علاوه بر تابع هدف مجموع هزینه‌ها): گرم شدن کره زمین و افزایش آلاینده‌های زیست محیطی بویژه انتشار گازهای گلخانه‌ای (کربن دی اکسید) به یک نگرانی جهانی تبدیل شده‌است. فعالیت‌های تولید و حمل و نقل مهم‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند [Niakan and Rahimi, 2015]. اهمیت این امر به ویژه در نقاط شهری که آلاینده‌ها تاثیر بیشتری را روی سلامت افراد جامعه می‌گذارند، بیشتر است. بر اساس آمار در سال ۲۰۱۶، ۱۰ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در ایالات متحده آمریکا به بخش بهداشت و درمان اختصاص دارد. این مقدار برای انگلستان به ۳ درصد و برای استرالیا به ۷ درصد می‌رسد [Malik et al. 2018]. از آنجایی که داروخانه‌ها و بیمارستانها در مناطق شهری احداث شده‌اند، حداقل یک مرحله از توزیع داروها در خیابانها و معابر شهری صورت می‌گیرد و تعداد دفعات توزیع با توجه به نوع داروها به طور معمول زیاد است، در این تحقیق تابع هدف کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است.

عدم نگهداری بیش از حد موجودی: با توجه به اینکه داروها تاریخ انقضاء دارند، نگهداری مقادیر بیشتر این اقلام می‌تواند موجب افزایش هزینه‌های ضایعات در سیستم شود. به این منظور محدودیت عدم نگهداری کالاها بیش از تعداد معینی دوره در مساله در نظر گرفته شده است.

با توجه به مطالب بیان شده هدف اصلی این پژوهش بررسی مساله یکپارچه سازی تصمیمات تولید، موجودی و مسیریابی در یک شبکه توزیع سه سطحی (شامل تولید کننده، عمده فروش و خورده فروش) در زنجیره تامین محصولات دارویی است. توابع هدف در نظر گرفته شده در مدل شامل حداقل‌سازی هزینه کل و حداقل‌سازی میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده است.

ادامه مقاله به این ترتیب سامان یافته است. در بخش ۲ مروری بر ادبیات موضوع صورت می‌گیرد. بخش ۳ به بیان فرضیات و مدل ریاضی مساله و بخش ٤ و ٥ نیز به ترتیب به بیان روش حل و بررسی درستی مدل از طریق اجرای آن بر روی یک مثال عددی می‌پردازد. در نهایت در بخش ٦ نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲. مرور ادبیات

در دنیای رقابتی امروز شیوه‌های مدیریت تولید سنتی کارایی خود را از دست داده‌اند و زنجیره تأمین به عنوان یک رویکرد یکپارچه برای مدیریت مناسب جریان مواد، کالا، اطلاعات و مالی، معرفی شده است. مساله تولید-مسیریابی یکی از کاربردهای برنامه‌ریزی یکپارچه است که تصمیمات تولید، توزیع و مسیریابی را به صورت مشترک بهینه‌سازی می‌کند [Adulyasak, Cordeau and Jans, 2015]. با توجه به اهمیت وجود مراکز عمده‌فروشی در زنجیره تامین دارو (نگهداری مقادیر زیاد موجودی و جلوگیری از بروز کمبود در سیستم) مساله تولید- مسیریابی سه سطحی یا دو مرحله‌ای برای مدل‌سازی این زنجیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه برنامه‌ریزی یکپارچه تولید- مسیریابی محصولات فسادپذیر و مسایل مسیریابی دو مرحله‌ای صورت گرفته است.

آرمسترانگ و همکارانش [Armstrong, Gao and Lei, 2008] مساله تولید و توزیع را برای یک کالای فسادپذیر، یک تسهیل تولیدی و چند مشتری بررسی کردند. یک وسیله نقلیه برای عملیات تحویل مورد استفاده قرار می‌گیرد و باید پنجره زمانی مورد نیاز را رعایت کند. هدف مدل حداکثر کردن تقاضاهای برآورده شده است. دو رویکرد برای حل مساله ارایه شده است: یک روش ابتکاری و یک روش جستجوی شاخه و حد. چن و همکارانش [Chen, Hsueh and Chang, 2009] یک مدل ریاضی غیرخطی برای تولید و توزیع چند محصول فسادپذیر و به منظور حداکثر کردن سود تولیدکننده ارایه کردند. قیمت محصولات وابسته به زمان بوده و تقاضای مشتریان به صورت تصادفی در نظر گرفته شده‌است. الگوریتم ارایه شده برای حل، مسایل تولید و مسیریابی وسایل نقلیه را جدا می‌کند.

چاهد و همکارانش [Chahed et al. 2011]ترکیب تولید و توزیع داروهای ضد سرطان را بررسی کردند. مدل آنها شامل یک کارخانه تولیدی و تعدادی بیمار به عنوان مشتری است. هر بیمار نیاز به داروی مخصوصی دارد که پس از تولید، توسط یک پرستار به منزل آنها تحویل داده می‌شود. پرستار باید همه بیماران را ویزیت کند به گونه‌ای که کل زمان سفر او مینیمم گردد. برای حل مساله از روش شاخه و کران استفاده شده است. سوسارلا و کریمی [Susarla and Karimi, 2012] یک مدل برنامه-ریزی عددصحیح آمیخته ساده و قدرتمند برای برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری‌های گسترده در صنعت دارو ارایه دادند. مدل آنها، خرید، تولید و توزیع را با توجه به عوارض مالیات‌های بین-المللی، هزینه‌های نگهداری موجودی، عمر قفسه‌ای مواد، دفع ضایعات و فاکتورهای واقعی موثر بر سود شرکت پس از کسر مالیات، یکپارچه و هماهنگ می‌کند.

کلانتری و پیشوایی [kalantari and Pishvaee, 2016] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح چندهدفه برای زنجیره تامین دارو ارایه دادند. هدف اول حداقل کردن کل هزینه‌های لجستیک و هدف دوم حداکثرکردن ارزش انتخاب تامین کنندگان است. رویکرد برنامه‌ریزی استوار امکانی برای حل مساله مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهشتی نیا و همکاران [Beheshtinia, Feyz and Sedady, 2017] یک الگوریتم کلونی زنبور عسل به منظور حل مساله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن

یکپارچگی زمانبندی حمل‌ونقل و تولید در زنجیره‌تأمین ارایه نمودند.

مسایل مسیریابی چند مرحله‌ای[1] (MEVRP) به منظور مطالعه و مدلسازی جریانهای موجود در یک شبکه توزیع چند لایه که در آن تحویل کالا از مبدا به مشتریان الزاما از طریق گره‌های میانی موجود در شبکه انجام می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرند [Perboli, Tadei and Vigo, 2011]. معمول‌ترین نمونه از مسائل مسیریابی چند مرحله‌ای، مساله مسیریابی وسایل نقلیه دو مرحله‌ای است که مرحله اول ارتباط دهنده انبارهای اصلی و انبارهای میانی[2] و مرحله‌ی دوم متصل‌کننده انبارهای میانی و مشتریان است [Liao, Lin and Shih, 2010]. مطالعه مسائل مسیریابی دو مرحله‌ای از سال ۲۰۰۹ و با پژوهش‌های کرینیک و همکارانش [Crainic, Ricciardi and Storchi, 2009] آغاز شد. آنها در پژوهش خود به بررسی مساله مسیریابی دو مرحله‌ای ظرفیت‌دار[3] در یک شبکه لجستیک شهری دو لایه پرداختند. وجود سفرهای چندگانه، انبارهای متعدد، محصولات متنوع، ناوگان حمل و نقل ناهمگن، پنجره زمانی نرم (برای مشتریان) و سخت (برای انبارهای میانی) از فرضیات مدل کرینیک بود. پس از آن پژوهشگران مختلف مدل‌های ریاضی متفاوتی از 2EVRP ارائه دادند که علاقه‌مندان برای مطالعه بیشتر میتوانند به مقالات [Perboli et al. 2011] و [Grangier et al. 2016] مراجعه کنند.

تعداد محدودی الگوریتم دقیق برای حل مساله مسیریابی دو مرحله‌ای توسعه داده شده است. بالداسی و همکارانش [Baldacci et al. 2013] در پژوهش خود مساله مسیریابی دو مرحله‌ای را به مجموعه‌ای از مسایل مسیریابی وسایل نقلیه ظرفیت‌دار و چند انباره تجزیه کردند. الگوریتم آنها بر این فرض استوار بود که تعداد مراکز میانی کمتر از ۱۰ باشد. بنابراین مسیرهای مرحله اول قابل شمارش بودند. سانتوس و همکاران [Santos, Mateus and da Cunha, 2014] نیز یک الگوریتم شاخه و قیمت ارایه کردند و در الگوریتم خود فرض کردند که تمام مسیرهای مرحله اول مشخص و معلوم هستند. آنها کارآیی این الگوریتم را بر روی نمونه‌هایی با حداکثر ۵ مرکز میانی و ۵۰ مشتری به اثبات رساندند.

با توجه به پیچیدگی مساله تعدادی الگوریتم ابتکاری و فرا ابتکاری نیز برای حل مسایل تولید و حمل و نقل ارایه شده است. به طور مثال برومند و بهشتی نیا [Borumand and Beheshtinia, 2018] ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش ویکور را برای حل مساله زمانبندی تولید-مسیریابی ارائه نموده‌اند. بهشتی نیا و همکاران [Beheshtinia, Ghasemi and Farokhnia, 2018] یک الگوریتم ژنتیک توسعه یافته به نام RGGA برای حل مساله زمانبندی تولید-مسیریابی ارائه نموده‌اند. بهشتی نیا و قاسمی [Beheshtinia and Ghasemi, 2018] یک الگوریتم فراابتکاری جدید به نام MLCA مبتنی بر مسابقات قهرمانی با چند لیگ مختلف را برای حل مساله تولید-مسیریابی پیشنهاد نمودند.

جهت مقایسه بهتر، تعدادی از مقالات منتشر شده در سال‌های اخیر در جدول ۱ طبقه‌بندی شده است. مهم‌ترین جنبه‌های مقایسه عبارتند از تعداد محصولات، نوع ناوگان حمل و نقل، قطعیت یا عدم قطعیت پارامترها، وجود پنجره‌زمانی، اهداف و غیره.

نزدیک‌ترین تحقیق در ادبیات موضوع به تحقیق حاضر، تحقیق انجام شده توسط جعفرخان و یعقوبی [Jafarkhan and Yaghoubi, 2017] است. تفاوت آن با تحقیق حاضر در این است که آنها به جای حالت چند محصولی، حالت تک محصولی را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین ناوگان حمل و نقل مساله آنها همگن است و تابع هدف مربوط به کمینه‌سازی "گازهای گلخانه‌ای" را مورد بررسی قرار نداده‌اند.

با مطالعه ادبیات موضوع جهت شناسایی جنبه‌های اصلی تفاوت تحقیق حاضر با سایر تحقیقات موجود در ادبیات موضوع می‌توان نوآوری‌های تحقیق را در موارد زیر دانست:

- در نظر گرفتن سیستم حمل و نقل دو مرحله‌ای در مساله تولید-موجودی-مسیریابی
- در نظر گرفتن تابع هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در مساله تولید-موجودی-مسیریابی محصولات فسادپذیر
- پیاده سازی مدل ارایه شده روی یک مطالعه موردی واقعی

قدم اول برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مسائل ریاضی، تعیین نحوه مواجهه با پارامترهای غیر قطعی و بررسی تاثیر در نظر گرفتن عدم قطعیت در برخی از پارامترها بر سایر پارامترها خواهد بود. پیچیدگی بکار بردن توابع توزیع (و به ویژه توابع توزیع همزمان)، کاربرد این روش (به ویژه وقتی چند پارامتر غیرقطعی وجود دارد) را محدود می‌کند. از مزایای رویکرد سناریو محور میتوان به سادگی پیاده‌سازی و عدم محدودیت در تعداد پارامترهای غیر قطعی در نظر گرفته شده اشاره کرد. از سوی دیگر پس از مشورت با خبرگان حوزه دارو مشخص شد که می‌توان تقاضا را بر اساس تعدادی سناریو تخمین زد. به همین دلیل در این مقاله از یک رویکرد برنامه ریزی تصادفی سناریو محور برای مقابله با عدم قطعیت در تقاضا استفاده می‌شود.

۳. مدل ریاضی

در این بخش یک مدل ریاضی چند هدفه به منظور برقراری تعادل بین هزینه‌های کل تولید و توزیع دارو و میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در فرآیند تولید و حمل و نقل ارائه شده است. همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، برای مدل‌سازی شبکه توزیع از مساله مسیریابی وسایل نقلیه دو مرحله‌ای استفاده می‌شود. بنابراین مساله مورد بررسی در این پژوهش، مساله تولید- موجودی- مسیریابی دو مرحله‌ای نامیده می‌شود.

مساله مورد بررسی در این پژوهش به صنعت داروسازی اختصاص دارد که در آن داروهای مختلف با عمر قفسه‌ای مشخص در کارخانه‌ها تولید می‌شود. داروها پس از تولید با استفاده از وسایل نقلیه سطح اول به مراکز توزیع منتقل و برای مدت محدودی ذخیره‌سازی می‌شوند. سپس داروها از مراکز توزیع با استفاده از وسایل نقلیه سطح دوم به خرده فروش‌ها تحویل داده می‌شوند. ظرفیت وسایل نقلیه سطح دوم معمولا کمتر از وسایل نقلیه سطح اول بوده و ناوگان مورد استفاده در هر دو سطح نیز ناهمگن است.

با توجه به اینکه پارامترها در دنیای واقعی دارای عدم قطعیت هستند، در این پژوهش فرض شده است که تقاضای خرده‌فروشیها برای داروهای مختلف در هر دوره زمانی تحت سناریوهای مختلف تغییر می‌کند که احتمال وقوع هر سناریو مشخص است.

خرده‌فروش‌ها در زنجیره تامین معرفی شده می‌تواند شامل داروخانه‌ها، بیمارستان‌ها و مراکز خدمات درمانی باشند که به دو دسته شبانه‌روزی و غیر شبانه‌روزی تقسیم‌بندی می‌شوند. داروخانه‌های شبانه روزی در هر ساعتی از دوره زمانی می‌توانند کالا دریافت کنند، در حالی که داروخانه‌های غیر شبانه‌روزی دارای پنجره زمانی برای دریافت دارو می‌باشند. هدف مساله یافتن میزان بهینه‌ی تولید هر دارو، میزان داروی ارسال شده بین سطوح مختلف، میزان داروی فاسد شده در مراکز توزیع و خرده-فروشیها و تعیین مسیرهای کارا برای وسایل نقلیه به منظور کمینه کردن هزینه‌های سیستم و میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده است. هزینه‌های سیستم عبارتند از هزینه‌های ثابت و متغیر تولید، هزینه‌های حمل و نقل، هزینه نگهداری و هزینه داروهای فاسد شده.

مساله شبکه توزیع دو مرحله‌ای روی گراف $G(N,A)$ تعریف می‌شود که N مجموعه گره‌های شبکه و A مجموعه کمان‌ها است. مجموعه گره‌ها متشکل از زیر مجموعه‌های تولیدکنندگان M، مراکز توزیع D و خرده‌فروش‌ها R است $(N = M \cup D \cup R)$. مجموعه کمان‌ها نیز از دو مجموعه مختلف A^1 و A^2 تشکیل شده است. $A^1 = \{(i,j): i < j, i,j \in M \cup D, (i,j) \notin M \times M\}$ شامل یال‌های متصل کننده تولیدکننده‌ها و مراکز توزیع و مراکز توزیع با یکدیگر است.

همچنین $A^2 = \{(i,j): i < j, i,j \in D \cup R, (i,j) \notin D \times D\}$ نشان‌دهنده یال‌های متصل‌کننده مراکز توزیع و خرده‌فروش‌ها و خرده‌فروش‌ها با یکدیگر است. در ادامه فرضیات، پارامترها و مدل ریاضی مساله بیان می‌شوند.

۳-۱ فرضیات مساله

فرضیات اصلی مرتبط با مدل ارائه شده به شرح زیر است:

- در هر دوره محصولات دارویی مختلفی در کارخانه‌ها تولید می‌شوند.
- تعداد و مکان تولیدکننده‌ها، مراکز توزیع و خرده فروش‌ها مشخص است.
- تقاضای خرده‌فروش‌ها برای هر محصول در هر دوره مشخص و قطعی است.
- وسایل نقلیه مورد استفاده در هر مرحله ناهمگن و دارای ظرفیت محدود هستند.
- هر خرده فروش یا مرکز توزیع در هر دوره حداکثر یکبار سرویس دهی می‌شود (با یک وسیله نقلیه).
- هر مسیر با یک وسیله نقلیه پوشش داده می‌شود.
- ظرفیت تولیدکننده‌ها برای تولید هر محصول محدود و مشخص است.

جدول ۱. مقالات بررسی شده در مرور ادبیات

نویسنده/ سال	کارخانه‌ها: یک	کارخانه‌ها: چند	تعداد محصولات	حمل و نقل دو مرحله ای	نوع ناوگان	عدم قطعیت	پنجره زمانی	تابع هدف
Karaoğlan and Kesen, [2017]	•		یک محصولی	–	همگن	–	–	حداقل زمان
[Yantong et al. 2016]	•		یک محصولی	–	همگن	–	–	حداکثر سود
Rezaeian, Haghayegh and Mahdavi, 2016		•	چند محصولی	–	همگن	–	–	حداقل هزینه
Vahdani, Niaki and Aslanzade, 2017	•		چند محصولی	–	نا همگن	–	دارد	حداکثر سود
Devapriya, Ferrell and Geismar, 2017	•		یک محصولی	–	همگن	–	–	حداقل هزینه
Niakan and Rahimi, 2015	•		چند محصولی	–	نا همگن	دارد	–	حداقل هزینه، حداقل داروی فاسد شده
Jafarkhan and Yaghoubi, 2017	•		یک محصولی	–	همگن	دارد	–	حداقل هزینه
[Zegordi & Marandi, 2017]	•		چند محصولی	–	همگن	–	دارد	حداقل هزینه تاخیر و هزینه مسافت
پژوهش حاضر		•	چند محصولی	دارد	نا همگن	دارد	دارد	حداقل هزینه، حداقل آلودگی

- تولیدکننده‌ها امکان ذخیره‌سازی محصول را ندارند و فرض می‌شود محصولات به صورت تازه به مراکز توزیع ارسال می‌شوند.
- ظرفیت نگهداری موجودی در مراکز توزیع و خرده فروش‌ها محدود است.
- کمبود (سفارشات عقب افتاده) مجاز نیست.
- هر دارو دارای عمر قفسه‌ای مشخصی است که مضرب صحیحی از طول یک دوره است.
- ارسال مستقیم دارو از تولیدکننده به خرده‌فروش‌ها مجاز نیست.

- هزینه تولید، حمل و نقل، نگهداری و فساد داروها مشخص است.
- خرده‌فروش‌هایی که به صورت شبانه روزی فعال نیستند دارای پنجره زمانی برای دریافت دارو می‌باشند.
- هر وسیله نقلیه سطح اول از یک مرکز تولید شروع به حرکت می‌کند و پس از خدمت‌دهی به مجموعه‌ای از مراکز توزیع به همان مرکز تولید برمی‌گردد.
- سفر هر وسیله نقلیه سطح دوم از یک مرکز توزیع شروع می‌شود و پس از تحویل کالا به خرده‌فروش‌های مشخص شده به همان مرکز توزیع برمی‌گردد.
- خرده‌فروش‌هایی که به صورت شبانه روزی فعال نیستند دارای پنجره زمانی برای دریافت دارو می‌باشند.
- هر وسیله نقلیه سطح اول از یک مرکز تولید شروع به حرکت می‌کند و پس از خدمت‌دهی به مجموعه‌ای از مراکز توزیع به همان مرکز تولید برمی‌گردد.
- سفر هر وسیله نقلیه سطح دوم از یک مرکز توزیع شروع می‌شود و پس از تحویل کالا به خرده‌فروش‌های مشخص شده به همان مرکز توزیع برمی‌گردد.

۳-۲ پارامترها و متغیرهای تصمیم

اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مساله به ترتیب در جداول ۲، ۳ و ٤ تعریف شده است.

جدول ۲. مجموعه‌ها و اندیس‌ها

مجموعه تولیدکننده‌ها	$m \in M$
مجموعه مراکز توزیع	$d \in D$
مجموعه خرده فروش‌ها	$l \in R$
مجموعه خرده فروش‌های غیر شبانه‌روزی	$lt \in RT$
مجموعه محصولات	$e \in E$
مجموعه وسایل نقلیه سطح اول	$k1 \in K_1$
مجموعه وسایل نقلیه سطح دوم	$k2 \in K_2$
مجموعه دوره‌های زمانی	$p \in P$
مجموعه سناریوهای مختلف برای تقاضا	$s \in S$
مجموعه گره‌های تولیدکننده‌ها و مراکز توزیع	$N_1 = M \cup D$
مجموعه گره‌های مراکز توزیع و خرده‌فروش‌ها	$N_2 = D \cup R$

جدول ۳. پارامترها

ظرفیت تولید داروی نوع e در مرکز تولید m در دوره p	Cap_{mep}	هزینه متوسط سفر از گره i به j گره	C_{ij}
ظرفیت نگهداری مرکز توزیع d	Cap_d	میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در سفر از گره i به j گره	ET_{ij}
ظرفیت نگهداری خرده‌فروش l	Cap_l	مسافت گره i از گره j	dis_{ij}
ظرفیت وسیله نقلیه $k1$ در سطح اول	Q^{k1}	هزینه راه‌اندازی تولید داروی نوع e در مرکزتولید m در دوره p	SC_{mep}
ظرفیت وسیله نقلیه $k2$ در سطح دوم	Q^{k2}	هزینه تولید هر واحد داروی نوع e در مرکزتولید m در دوره p	VC_{mep}
میانگین سرعت وسیله نقلیه $k1$ در سطح اول	S^{k1}	میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در تولید هر واحد داروی نوع e در مرکزتولید m در دوره p	VE_{mep}
میانگین سرعت وسیله نقلیه $k2$ در سطح دوم	S^{k2}	هزینه متغیر آماده‌سازی و مرتب سازی هر واحد دارو در مرکز توزیع d در دوره p	VC_{dp}
مدت زمان خدمت‌دهی به گره $i \in N_1$ توسط وسیله نقلیه $k1$ در دوره p	RT_{ip}^{k1}	هزینه ثابت استفاده از هر وسیله نقلیه $k1$ سطح اول	FVF^{k1}
مدت زمان خدمت‌دهی به گره $i \in N_2$ توسط وسیله نقلیه $k2$ در دوره p	RT_{ip}^{k2}	هزینه ثابت استفاده از هر وسیله نقلیه $k2$ سطح دوم	FVS^{k2}
عمر قفسه‌ای داروی نوع e	SL_e	هزینه نگهداری هر واحد داروی نوع e در مرکز توزیع d در دوره p	HC_{dep}
احتمال وقوع سناریوی s	P_s	هزینه نگهداری هر واحد داروی نوع e در خرده-فروشی lدر دوره p	HC_{lep}
زودترین زمان رسیدن پنجره زمانی مربوط به خرده فروش lt در دوره p	$ER_{lt,p}$	هزینه فاسد شدن هر واحد داروی نوع e در دوره p	CT_{ep}
دیرترین زمان رسیدن پنجره زمانی مربوط به خرده فروش lt در دوره p	$LR_{lt,p}$	تقاضای خرده‌فروش l برای داروی نوع e در دوره p تحت سناریوی s	D_{leps}
موجودی اطمینان گره‌های سطح دوم $j \in N_2$	SS_j	یک عدد بزرگ مثبت	$BigN$

جدول ٤. متغیرهای تصمیم

EX_{leps}	میزان داروی فاسد شده نوع e در دوره p در خرده‌فروش l تحت سناریوی s	Z_{mep}	برابر یک است اگر داروی نوع e در دوره p در مرکز تولید m تولید شود، در غیر اینصورت برابر صفر است.
I_{deps}	میزان موجودی داروی نوع e در مرکز توزیع d در انتهای دوره p تحت سناریوی s	B_{dlp}	برابر یک است اگر خرده‌فروش lدر دوره p تحت پوشش مرکز توزیع d قرار گیرد، در غیر اینصورت برابر صفر است.
I_{leps}	میزان موجودی داروی نوع e در خرده‌فروشی l در انتهای دوره p تحت سناریوی s	x_{ijp}^{k1}	برابر یک است اگر وسیله نقلیه $k1$ در دوره p از گره i به گره j سفر کند، در غیر اینصورت برابر صفر است. $i,j \in N_1$
AT_{ip}^{k1}	زمان رسیدن وسیله نقلیه $k1$ به گره $i \in N_1$ در دوره p	r_{ijp}^{k2}	برابر یک است اگر وسیله نقلیه $k2$ در دوره p از گره i به گره j سفر کند، در غیر اینصورت برابر صفر است. $i,j \in N_2$
DT_{ip}^{k1}	زمان خروج وسیله نقلیه $k1$ از گره $i \in N_1$ در دوره p	h_{meps}	میزان تولید داروی نوع e در مرکزتولید m در دوره p تحت سناریوی s
AT_{ip}^{k2}	زمان رسیدن وسیله نقلیه $k2$ به گره $i \in N_2$ در دوره p	Y_{mdeps}^{k1}	میزان داروی نوع e که در دوره p با استفاده از وسیله نقلیه $k1$ از تولیدکننده m به مرکز توزیع d تحت سناریوی s تحویل داده می‌شود.
DT_{ip}^{k2}	زمان خروج وسیله نقلیه $k2$ از گره $i \in N_2$ در دوره p	Y_{dleps}^{k2}	میزان داروی نوع e که در دوره p با استفاده از وسیله نقلیه $k2$ از مرکز توزیع d به خرده فروش l تحت سناریوی s تحویل داده می‌شود.
		EX_{deps}	میزان داروی فاسد شده نوع e در دوره p در مرکز توزیع d تحت سناریوی s

۳-۳ مدل ریاضی

تابع هدف اول از مدل ریاضی به حداقل‌سازی هزینه‌های ثابت و متغیر تولید، حمل و نقل، نگهداری موجودی و فساد دارو می‌پردازد. تابع هدف دوم نیز به حداقل‌سازی میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده هنگام تولید و حرکت وسایل نقلیه اختصاص دارد. روابط زیر به محاسبه توابع هدف مساله می پردازد.

$$\boldsymbol{Min\ Z1 = C_{Production} + C_{Transportation} + C_{Holding} + C_{ExpiredDrug}}$$

$$\boldsymbol{Min\ Z2 = C_{CO2emission}}$$

$$C_{Production} = \sum_p \sum_m \sum_e SC_{mep} * Z_{mep} + \sum_s P_s \left[\sum_p \sum_m \sum_e VC_{mep} * h_{meps} + \sum_p \sum_d \sum_l \sum_e \sum_{k2} VC_{dp} * Y_{dleps}^{k2} \right]$$

$$C_{Transportation} = \sum_{p}\sum_{k1}\sum_{i\in N_1}\sum_{j\in N_1} C_{ij} * x_{ijp}^{k1} + \sum_{p}\sum_{k2}\sum_{i\in N_2}\sum_{j\in N_2} C_{ij} * r_{ijp}^{k2} + \sum_{p}\sum_{k1}\sum_{m}\sum_{d} \mathrm{FVF}^{k1} * x_{mdp}^{k1} + \sum_{p}\sum_{k1}\sum_{d}\sum_{l} \mathrm{FVS}^{k2} * r_{dlp}^{k2}$$

$$C_{Holding} = \sum_{s} P_s \left[\sum_{p}\sum_{d}\sum_{e} HC_{dep} * I_{deps} + \sum_{p}\sum_{l}\sum_{e} HC_{lep} * I_{leps}\right]$$

$$C_{ExpiredDrug} = \sum_{s} P_s \left[\sum_{p}\sum_{d}\sum_{e} CT_{ep} * EX_{deps} + \sum_{p}\sum_{l}\sum_{e} CT_{ep} * EX_{leps}\right]$$

$$C_{CO2emission} = \sum_{p}\sum_{k1}\sum_{i\in N_1}\sum_{j\in N_1} ET_{ij} * x_{ijp}^{k1} + \sum_{p}\sum_{k2}\sum_{i\in N_2}\sum_{j\in N_2} ET_{ij} * r_{ijp}^{k2} + \sum_{s} P_s \left[\sum_{p}\sum_{m}\sum_{e} VE_{mep} * h_{meps}\right]$$

- **محدودیت‌های مسیریابی**

$$\sum_{i\in N_2}\sum_{k2} r_{ilp}^{k2} \le 1 \qquad \forall l,p \qquad (۱)$$

محدودیت ۱ تضمین می‌کند که هر مشتری حداکثر یک بار در هر دوره خدمت دریافت می‌کند.

$$\sum_{j\in N_2} r_{ijp}^{k2} = \sum_{j\in N_2} r_{jip}^{k2} \qquad \forall i\in N_2, k2, p \qquad (۲)$$

محدودیت ۲ مربوط به جریان ورود و خرج کالا برای هر مشتری است. همچنین این محدودیت سبب می‌شود که هر ماشین به مرکز توزیعی که از آن شروع به حرکت نموده است، بازگردد.

$$\sum_{d}\sum_{l} r_{dlp}^{k2} \le 1 \qquad \forall k2, p \qquad (۳)$$

این محدودیت تضمین می‌کند که هر وسیله نقلیه سطح دوم حداکثر یکبار در هر دوره مورد استفاده قرار گیرد.

$$\sum_{l}\sum_{e}\sum_{i\in N_2} D_{leps} * r_{ilp}^{k2} \le \mathrm{Q}^{k2} \qquad \forall k2, p, s \qquad (٤)$$

هر وسیله نقلیه سطح دوم می‌تواند به خرده‌فروشانی کالا ارسال کند که تقاضای آنها کمتر از ظرفیت وسیله نقلیه باشد.

$$\sum_{d}\sum_{e} Y_{dleps}^{k2} \le \mathrm{Q}^{k2} * \sum_{i\in N_2} r_{ilp}^{k2} \qquad \forall l, k2, p, s \qquad (۵)$$

محدودیت ۵ بیان می‌کند که اگر وسیله نقلیه $k2$ به خرده-فروش l سفر نکند، هیچ کالایی هم به آن خرده‌فروش تحویل نمی‌دهد و در صورتی که خرده‌فروش l در مسیر وسیله نقلیه باشد، میزان کالای تحویلی به آن حداکثر به اندازه ظرفیت وسیله نقلیه خواهد بود.

$$\sum_{i\in N_1}\sum_{k1} x_{idp}^{k1} = \sum_{l}\sum_{k2} r_{dlp}^{k2} \qquad \forall d, p \qquad (٦)$$

محدودیت ٦ بیان می‌کند که یک مرکز توزیع تنها زمانی می-تواند در سطح دوم به خرده‌فروش‌ها خدمت‌دهی کند که در سطح اول از یک مرکز تولیدی کالا دریافت کرده باشد.

$$\sum_{m}\sum_{d} x_{mdp}^{k1} \le 1 \qquad \forall k1, p \qquad (۷)$$

محدودیت ۷ تضمین می‌کند که هر وسیله نقلیه سطح اول در هر دوره حداکثر یکبار مورد استفاده قرار گیرد.

$$\sum_{j\in N_1} x_{ijp}^{k1} = \sum_{j\in N_1} x_{jip}^{k1} \qquad \forall i\in N_1, k1, p \qquad (۸)$$

محدودیت ۸ تعادل جریان ورودی و خروجی در گره‌های سطح اول (مراکز تولید و توزیع) را تضمین می‌کند.

$$\sum_{m}\sum_{d}\sum_{e} Y_{mdeps}^{k1} \le \mathrm{Q}^{k1} \qquad \forall k1, p, s \qquad (۹)$$

این محدودیت، ضمانت رعایت ظرفیت هر یک از وسایل نقلیه سطح اول است.

$$\sum_{m}\sum_{e} Y_{mdeps}^{k1} \le \mathrm{Q}^{k1} * \sum_{i\in N_1} x_{idp}^{k1} \qquad \forall d, k1, p, s \qquad (۱۰)$$

این محدودیت بیانگر آن است که اگر وسیله نقلیه $k1$ مرکز توزیع d را ویزیت ننماید، هیچ کالایی به آن مرکز تحویل داده نخواهد شد، و درصورتی که آن مرکز را ویزیت نماید، ظرفیت وسیله نقلیه منظور خواهد شد.

- **محدودیت‌های تولید**

$$Z_{mep} \leq \sum_d \sum_{k1} x_{mdp}^{k1} \qquad \forall m,e,p \qquad (۱۱)$$

این محدودیت تضمین می‌کند که یک مرکز تولیدی تنها در صورتی می‌تواند به مراکز توزیع خدمت‌دهی کند که در آن دوره دارویی تولید کرده باشد.

$$h_{meps} = \sum_d \sum_{k1} Y_{mdeps}^{k1} \qquad \forall m,e,p,s \qquad (۱۲)$$

محدودیت ۱۲ میزان داروی تولیدی در هر دوره را محاسبه می نماید که برابر با میزان داروی ارسال شده به مراکز توزیع است.

$$h_{meps} \leq CapM_{mep} * Z_{mep} \qquad \forall m,e,p,s \qquad (۱۳)$$

ظرفیت تولید در هر یک از مراکز تولیدی دارو در این محدودیت اعمال شده است

- **محدودیت‌های تعادل و نگهداری موجودی در مراکز توزیع و خرده‌فروشیها**

$$\sum_d B_{dlp} \leq 1 \qquad \forall l,p \qquad (۱٤)$$

محدودیت ۱٤ بیان می‌کند که هر خرده‌فروش حداکثر به یک مرکز توزیع تخصیص خواهد یافت.

$$\sum_l \sum_e D_{leps} * B_{dlp} \leq Cap_d \qquad \forall d,s,p \qquad (۱۵)$$

این محدودیت تضمین می‌دارد که خرده‌فروشهایی تحت پوشش هر مرکز توزیع قرار می‌گیرند که مجموع تقاضای آنها کمتر از ظرفیت مرکز توزیع باشد.

$$\sum_{i\in N_2} r_{ilp}^{k2} + \sum_{i\in N_2} r_{dip}^{k2} - B_{dlp} \leq 1 \qquad \forall d,l,k2,p \qquad (۱٦)$$

این محدودیت شرط تخصیص یک خرده‌فروش به یک مرکز توزیع را بررسی می‌کند. به این ترتیب زمانی یک خرده‌فروش به یک مرکز توزیع تخصیص می‌یابد که یک وسیله نقلیه از مرکز توزیع خارج شده و به مشتری مورد نظر سرویس دهد.

$$I_{le(p-1)s} + \sum_d \sum_{k2} Y_{dleps}^{k2} - EX_{leps} = D_{leps} + I_{leps} \qquad \forall l,e,p,s \qquad (۱۷)$$

محدودیت ۱۷، محدودیت تعادل موجودی در هر یک از خرده‌فروشیها است.

$$I_{de(p-1)s} + \sum_m \sum_{k1} Y_{mdeps}^{k1} - EX_{deps} = \sum_l \sum_{k2} Y_{dleps}^{k2} + I_{deps} \qquad \forall d,e,p,s \qquad (۱۸)$$

این محدودیت، تعادل جریان را در هر یک از توزیع کننده‌های موجود در زنجیره تامین تضمین می‌نماید.

$$SS_d \leq \sum_e I_{deps} \leq Cap_d \qquad \forall d,p,s \qquad (۱۹)$$

محدودیت نگهداری موجودی در مراکز توزیع است.

$$SS_l \leq \sum_e I_{leps} \leq Cap_l \qquad \forall l,p,s \qquad (۲۰)$$

محدودیت ۲۰ مربوط به ظرفیت نگهداری موجودی در انبار خرده‌فروش‌ها است.

- **محدودیت محاسبه میزان داروی فاسد شده در مراکز توزیع و خرده‌فروشیها**

$$EX_{leps} \geq \sum_d \sum_{k2} \sum_{t=1}^{p-SL_e} Y_{dlets}^{k2} - \sum_{t=1}^{p} D_{lets} \qquad \forall l,e,s,p > SL_e \qquad (۲۱)$$

محاسبه میزان داروی فاسد شده در خرده فروشیها

$$EX_{deps} \geq \sum_m \sum_{k1} \sum_{t=1}^{p-SL_e} Y_{mdets}^{k1} - \sum_l \sum_{k2} \sum_{t=1}^{p} Y_{dlets}^{k2} \qquad \forall d,e,s,p > SL_e \qquad (۲۲)$$

محاسبه میزان داروی فاسد شده در مراکز توزیع

- **محدودیت پنجره زمانی**

$$DT1_{mp}^{k1} = 0 \qquad \forall\, m, k1, p \qquad (۲۳)$$

محدودیت تعیین مبدا زمان برنامه‌ریزی که صفر در نظر گرفته شده است.

$$DT1_{dp}^{k1} \geq AT1_{dp}^{k1} + RT1_{dp}^{k1} \qquad \forall\, d, k1, p \qquad (۲٤)$$

این محدودیت زمان خروج وسایل نقلیه سطح اول از مراکز توزیع را محاسبه می‌کند.

$$AT1_{jp}^{k1} \geq DT1_{ip}^{k1} + \frac{dis_{ij}}{S1^{k1}} - BigN\left(1 - x_{ijp}^{k1}\right)$$
$$\forall\, i, j \in N_1, k1, p \qquad (۲۵)$$

محدودیت ۲۵ به محاسبه زمان رسیدن وسایل نقلیه به گره‌های سطح اول یعنی تولیدکننده‌ها و مراکز توزیع می‌پردازد.

$$DT2_{dp}^{k2} \geq DT1_{dp}^{k1} \qquad \forall\, d, k1, k2, p \qquad (۲٦)$$

این محدودیت بیان میکند که خروج وسایل نقلیه سطح دوم از مراکز توزیع، پس از خروج وسایل نقلیه سطح اول از این مراکز امکان پذیر است.

$$DT2_{lp}^{k2} \geq AT2_{lp}^{k2} + RT2_{lp}^{k2} \qquad \forall\, l, k2, p \qquad (۲۷)$$

این محدودیت زمان خروج وسایل نقلیه سطح دوم از خرده فروشیها را محاسبه می‌کند.

$$AT2_{jp}^{k2} \geq DT2_{ip}^{k2} + \frac{dis_{ij}}{S2^{k2}} - BigN(1 - r_{ijp}^{k2})$$
$$\forall\, i, j \in N_2, k2, p \qquad (۲۸)$$

محدودیت ۲۸ به محاسبه زمان رسیدن وسایل نقلیه به گره‌های سطح دوم یعنی مراکز توزیع و خرده‌فروشیها می‌پردازد.

$$ER_{lt,p} \leq AT2_{lt,p}^{k2} \leq LR_{lt,p} \qquad \forall\, lt \in RT, k2, p \qquad (۲۹)$$

محدودیت پنجره زمانی برای خرده‌فروشیها یا داروخانه‌هایی که به صورت غیر شبانه‌روزی فعالیت می‌کنند.

- **محدودیت‌های فنی روی متغیرهای تصمیم**

$$h_{meps}, Y_{mdeps}^{k1}, Y_{dleps}^{k2}, EX_{deps}, EX_{leps} \geq 0 \qquad (۳۰)$$
$$I_{deps}, I_{leps}, AT_{ip}^{k1}, DT_{ip}^{k1}, AT_{ip}^{k2}, DT_{ip}^{k2} \geq 0$$

$$x_{ijp}^{k1}, r_{ijp}^{k2}, B_{dlp}, Z_{mep} \in \{0,1\} \qquad (۳۱)$$

مدل ارائه شده در این مقاله، ترکیبی از دو مساله مشهور تعیین اندازه انباشه، تولید و مسیریابی وسایل نقلیه دو مرحله‌ای است که با توجه به پژوهش‌های [Seyedhosseini and Ghoreyshi, 2014, Qiu, Qiao and Pardalos, 2016] از جمله مسایل NP-hard هستند. بنابراین مساله مورد بررسی در این تحقیق نیز از نوع NP-hard است و حل این مدل در ابعاد متوسط و بزرگ نیازمند استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری است. در ادامه به منظور اثبات صحت عملکرد مدل یک مطالعه موردی طراحی و نتایج آن بررسی می‌شود. با توجه به مقیاس کوچک مطالعه موردی از الگوریتم حل دقیق محدودیت اپسیلون تکمیل شده برای حل استفاده شده و در نرم افزار بهینه‌سازی GAMS پیاده‌سازی و اجرا می‌شود.

٤. روش محدودیت اپسیلون[٤]

مساله چند هدفه زیر را در نظر بگیرید:

$$min\left(f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)\right) \qquad (۳۲)$$
$$s.t$$
$$x \in \boldsymbol{S}$$

که در آن x بردار متغیرهای تصمیم، $f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)$ توابع هدف و $\boldsymbol{S}$ فضای شدنی مساله است. در روش محدودیت اپسیلون یکی از اهداف را با

در نظر گرفتن سایر توابع هدف به عنوان محدودیت، بهینه می‌کنیم. ترکیب توابع هدف در بخش محدودیت‌ها به صورت زیر نشان داده می‌شود [Haimes and Chankong, 1983].

$$min\ f_1(x) \qquad (۳۳)$$
$$s.t$$
$$f_2(x) \le e_2$$
$$f_3(x) \le e_3$$
$$\cdots$$
$$f_p(x) \le e_p$$
$$x \in \boldsymbol{S}.$$

با تغییر در مقادیر سمت راست محدودیت‌های مربوط به توابع هدف (e_iها)، جواب‌های کارای مساله محاسبه می‌شوند. به منظور استفاده از این روش ابتدا باید دامنه هر تابع هدف یا حداقل دامنه $p-1$ تابع هدف که به عنوان محدودیت در نظر گرفته شده‌اند، محاسبه گردد. معمول‌ترین روش محاسبه این دامنه‌ها استفاده از جدول بازده[۵] است. برای محاسبه جدول بازده هر تابع هدف f_i را به صورت جداگانه در فضای اصلی مساله حل کرده و جواب بهینهی آن را بدست می‌آوریم. فرض می‌کنیم این جواب بهینه x^i باشد. سپس با استفاده از بردار جواب x^i مقادیر سایر توابع هدف را محاسبه می‌کنیم که برابر $f_1(x^i), f_2(x^i), \dots, f_{i-1}(x^i), f_{i+1}(x^i), \dots, f_p(x^i)$ خواهد شد. دامنه هر تابع هدف با ماکزیمم و مینیمم‌گیری از ستون مربوطه در جدول بازده بدست می‌آید.

در مرحله بعد دامنه توابع هدف $f_2, \dots, f_p$ را به ترتیب به $q_2, \dots, q_p$ فاصله‌ی مساوی تقسیم می‌کنیم که این فاصله‌ها شامل $(q_2-1), \dots, (q_p-1)$ نقطه شبکه‌ای[۶] میانی با فاصله‌ی یکسان می‌شوند. با در نظر گرفتن نقاط بیشینه و کمینه اهداف، تعداد نقاط شبکه‌ای برای هر تابع هدف برابر : q_i+1 $i=2,\dots,p$ نقطه خواهد بود. بنابراین برای بدست آوردن مجموعه جواب‌های کارا باید $\prod_{i=2}^{p} q_i + 1$ زیر مساله‌ی بهینه‌سازی را حل کنیم. با حل هر زیر مساله یک جواب کارا برای مساله اصلی محاسبه می‌شود. ممکن است برخی از زیر مساله‌ها دارای فضای نشدنی باشند که از فرآیند حل کنار گذاشته می‌شوند .

روش محدودیت اپسیلون دارای سه ضعف اصلی است. ۱) دامنه توابع هدف که از طریق جدول بازده محاسبه می‌شوند روی مجموعه جوابهای کارا قرار نمی‌گیرند. ۲) ممکن است جوابهای حاصل از حل برخی زیر مساله‌ها توسط سایر جوابها مغلوب شوند که به آنها جواب کارای ضعیف گفته می‌شود. به عبارت دیگر این روش تضمینی برای محاسبه جواب کارای قوی نمی‌دهد. ۳) برای مسایل با بیش از دو تابع هدف، زمان حل افزایش می‌یابد. برای غلبه بر این ضعف‌ها روش محدودیت اپسیلون تکمیل شده[۷] ارائه شده است.

در روش محدودیت اپسیلون تکمیل شده برای حل مشکل اول محدودیت اپسیلون از روش بهینه‌سازی لکسیکوگراف[۸] به منظور محاسبه جدول بازده استفاده می‌شود. برای حل مشکل دوم، مساله‌ی (۳۳) به شکل مساله (۳۴) تغییر داده می‌شود. در مساله (۳۴) متغیرهای مازاد یا کمبود به محدودیت‌های مربوط به توابع هدف اضافه شده و این محدودیت‌ها به شکل تساوی درمی‌آیند. مجموع متغیرهای کمکی نیز در تابع هدف کمینه می‌شود. برای حل مشکل سوم نیز روش محدودیت اپسیلون تکمیل شده به گونه‌ای اجرا می‌شود که در صورت مشاهده جواب نشدنی در زیر مساله‌های مربوط به یکی از اهداف، از حلقه‌ی حل آن هدف خارج شده و سایر نقاط شبکه‌ای آن هدف را بررسی نمی‌کند. به این ترتیب زمان حل مساله کاهش می‌یابد [Mavrotas, 2009].

$$min\ (f_1(x) - eps * (s_2 + \cdots + s_p)) \qquad (۳۴)$$
$$s.t$$
$$f_2(x) + s_2 = e_2$$
$$f_3(x) + s_3 = e_3$$
$$\cdots$$
$$f_p(x) + s_p = e_p$$
$$x \in \boldsymbol{S}, s \in \boldsymbol{R}^+.\ \ (eps \in (10^{-6}, 10^{-3}))$$

برای جلوگیری از تاثیر واحد یا مقیاس توابع هدف بر جواب-ها، می‌توان در مساله (۳۴) از تابع هدف زیر استفاده نمود که در آن r_i دامنه‌ی تابع هدف iام است.

$$min\ (f_1(x) - eps * (s_2/r_2 + \cdots + s_p/r_p)) \quad (۳۵)$$

با توجه به توانایی بالای روش محدودیت اپسیلون تکمیل شده در محاسبه مجموعه جواب‌های کارا، در پژوهش حاضر نیز از همین روش برای حل مدل دو هدفه استفاده شده است.

۵. مطالعه موردی

در این بخش کارآیی مدل پیشنهادی از طریق یک مطالعه موردی ارزیابی می‌شود. شرکت دانش بنیان بایرپل فناور یک شرکت دارویی است که در زمینه تولید انواع واکسن فعالیت می‌کند. در این قسمت مدل پیشنهادی روی زنجیره تامین دو محصول واکسن انفلوانزا و واکسن فلج اطفال تزریقی این شرکت اجرا و تحلیل می گردد. مدل ارائه شده از طریق کدنویسی در نرم افزار GAMS 24.1.2 با استفاده از یک لپ تاپ پنج هسته‌ای با ۲,۴۰ گیگاهرتز سرعت پردازنده توسط حل کننده CPLEX حل شده است.

شرکت بایرپل فناور در سال ۱۳۸۹ در پارک فناوری پردیس به عنوان یک شرکت خصوصی خانوادگی تاسیس گردید و عمده فعالیت‌های آن عبارتند از تولید واکسن‌های انسانی، تولید مواد اولیه دارویی، تولید کیت‌های تشخیصی مولکولی و بیوتکنولوژی و آزمایشگاه کنترل کیفی دارو، واکسن و مواد خوراکی.

استان تهران دارای ۱۱ بیمارستان تامین اجتماعی است که به عنوان نقاط تقاضا انتخاب می‌شوند.

از آنجایی که نرخ مصرف واکسن در فصول مختلف متفاوت است، افق زمانی یک ساله و شامل چهار دوره زمانی (چهار فصل) به منظور برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است. برای محاسبه تقاضای هر بیمارستان ابتدا تقاضای کل هر واکسن با استفاده از داده‌های تاریخی موجود در سازمان غذا و دارو محاسبه می‌شود. سپس به منظور تخمین تقاضای هر بیمارستان در هر سال، تقاضای سالانه‌ی کل در نسبت جمعیت تحت پوشش هر بیمارستان به جمعیت استان تهران ضرب می‌شود. بر اساس نظر خبرگان سه سناریو با احتمالات به ترتیب ۰/۵، ۰/۳۵ و ۰/۱۵ برای تقاضای بیمارستانها در هر دوره در نظر گرفته شده است. تقاضای خرده‌فروشیها در سناریوهای دوم و سوم به ترتیب ۱۵ درصد بیشتر و ۱۰ درصد کمتر از سناریوی اول است.

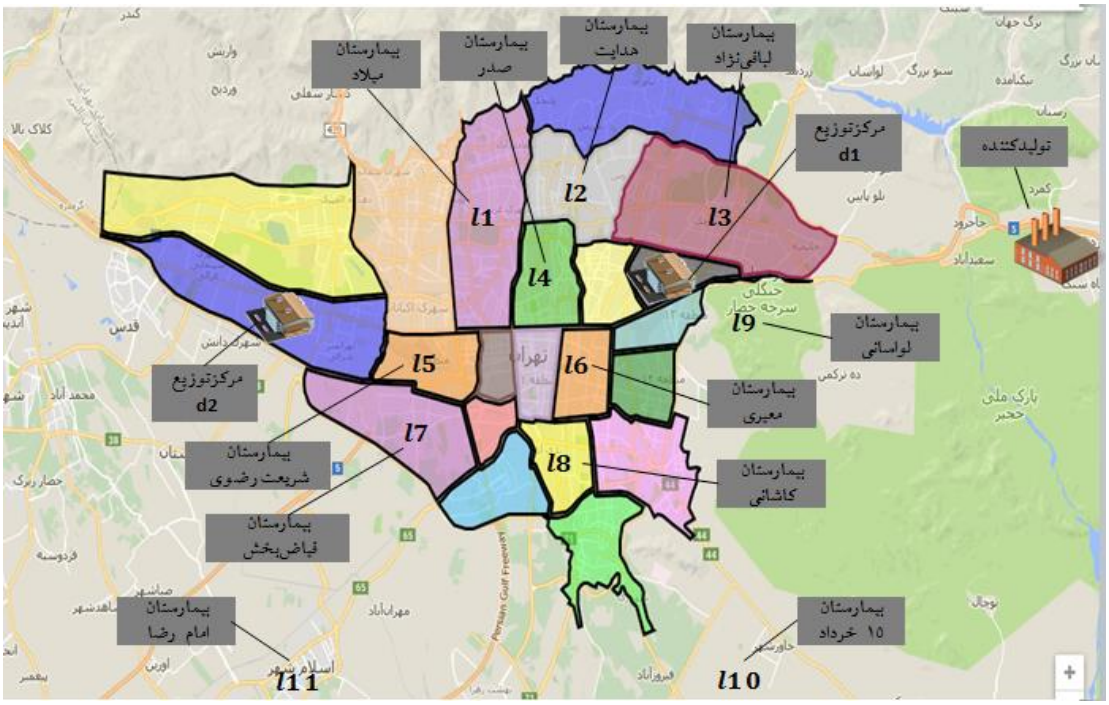
جدول ۵. تقاضای هر بیمارستان برای هر واکسن در هر دوره زمانی (دوز) بر اساس سناریوی اول

بیمارستان	واکسن آنفلوانزا				واکسن فلج اطفال			
	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
۱	۳۸۷۷	۱۳۵۶۸	۱۵۵۰۷	۵۸۱۵	۲۳۲۶۰	۳۴۸۹۰	۲۹۰۷۵	۲۹۰۷۵
۲	۲۰۴۸	۷۱۶۸	۸۱۹۲	۳۰۷۲	۱۲۲۸۸	۱۸۴۳۱	۱۵۳۹۵	۱۵۳۹۵
۳	۴۲۱۰	۱۴۷۳۷	۱۶۸۴۲	۶۳۱۶	۲۵۲۶۳	۳۷۸۹۴	۳۱۵۷۸	۳۱۵۷۸
۴	۲۲۳۲	۷۸۱۳	۸۹۲۹	۳۳۴۸	۱۳۳۹۴	۲۰۰۹۱	۱۶۷۴۲	۱۶۷۴۲
۵	۱۲۲۳	۴۲۸۲	۴۸۹۳	۱۸۳۵	۷۳۴۰	۱۱۰۰۹	۹۱۷۴	۹۱۷۴
۶	۱۹۷۱	۶۸۹۷	۷۸۸۳	۲۹۵۶	۱۱۸۲۴	۱۷۷۳۶	۱۴۷۸۰	۱۴۷۸۰
۷	۲۴۰۴	۸۴۱۵	۹۶۱۷	۳۶۰۶	۱۴۴۲۵	۲۱۶۳۸	۱۸۰۳۱	۱۸۰۳۱

۸	۳٤٤۳	۱۲۰۵۱	۱۳۷۷۳	۵۱٦۵	۲۰٦۵۹	۳۰۹۸۸	۲۵۸۲۳	۲۵۸۲۳
۹	۷۵۵	۲٦٤۲	۳۰۲۰	۱۱۳۲	٤۵۲۹	٦۷۹٤	۵٦٦۲	۵٦٦۲
۱۰	۱٤۳۰	۵۰۰۵	۵۷۲۰	۲۱٤۵	۸۵۸۰	۱۲۸۷۱	۱۰۷۲۵	۱۰۷۲۵
۱۱	۱۳۲۰	٤٦۲۱	۵۲۸۲	۱۹۸۱	۷۹۲۳	۱۱۸۸٤	۹۹۰۳	۹۹۰۳

جدول ۵ شامل اطلاعات تقاضای هر بیمارستان بر اساس سناریوی اول است. برای توزیع واکسن‌ها نیز از شرکت پخش داروی البرز استفاده می‌شود که دارای دو شعبه در مناطق ۸ و ۲۱ تهران است. شکل ۱ مکان‌های مرکز تولید، مراکز توزیع و همچنین بیمارستان‌ها را بر روی نقشه استان تهران نشان می‌دهد.

برای محاسبه‌ی فاصله بین گره‌های مختلف از Google Maps استفاده شده است. پس از مشورت با شرکت توزیع البرز و محاسبه‌ی هزینه حمل و نقل به ازای هر کیلومتر و با استفاده از وسایل نقلیه‌ی عایق‌دار و دارای محفظه‌ی مخصوص حمل داروهای یخچالی، هزینه سفر بین گره‌های مختلف شبکه بدست می‌آید.



شکل ۱. مکان گره‌های مختلف شبکه (مرکز تولید، مراکز توزیع و بیمارستان‌ها)

جدول ٦. اطلاعات مراکز توزیع و خرده فروشی‌ها

گره‌های شبکه	ظرفیت نگهداری (دوز)	دوره	هزینه نگهداری (تومان)		هزینه آماده‌سازی و مرتب‌سازی (تومان)
			آنفلوانزا	فلج اطفال	

d1	۳۵۰۰۰۰	۱و۲	٤٥٨	۱۸۳	۲۰
		۳و٤	٤٤٤	۱۷۷	۲۰
d2	۳۰۰۰۰۰	۱و۲	٤٥٨	۱۸۳	۲۰
		۳و٤	٤٤٤	۱۷۷	۲۰
l1	۵۰۰۰۰	۱و۲	۷٦٤	۱۸۳	---
		۳و٤	۷٤۰	۱۷۷	---

جدول ۷. اطلاعات مرکز تولید

دوره	ظرفیت تولید (هزار دوز)		هزینه تولید (هزار تومان)	
	آنفلوانزا	فلج اطفال	آنفلوانزا	فلج اطفال
۱	۳۷/۵	۲۲۵	۱٤	۵
۲	۱۳۰/۵	۳۳۷/۵	۱٤	۵
۳	۱۵۰	۲۸۰/۵	۱٤	۵
٤	۵۵	۲۷۰	۱٤	۵

جدول ٦ نیز شامل اطلاعات مربوط به مراکز توزیع و بیمارستانها است. برای جلوگیری از بیان اطلاعات اضافی تنها اطلاعات مربوط به بیمارستان اول در این جدول آورده شده است. اطلاعات مربوط به شرکت تولید کننده از جمله ظرفیت تولید و هزینه متغیر تولید هر واکسن در جدول ۷ نشان داده شده است.

میزان مصرف سوخت یا گازهای گلخانه‌ای منتشر شده به نوع وسیله نقلیه، سرعت وسیله نقلیه و همچنین فاصله‌ی سفر بستگی دارد [Demir, Bektas and Laporte, 2011]. در این مقاله به منظور محاسبه‌ی میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در مسیریابی از رویکرد هایسکمن و همکاران استفاده شده است [Çimen and Soysal, 2017]. اگر فرض شود یک وسیله نقلیه مسافت یک کیلومتری را با سرعت متوسط S (کیلومتر بر ساعت) طی می‌کند، کل میزان گازهای گلخانه‌ای تولید شده (بر حسب گرم بر کیلومتر) بر اساس رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$F = K + a\,S + b\,S^2 + c\,S^3 + \frac{d}{S} + \frac{e}{S^2} + \frac{f}{S^3} \quad (٣٦)$$

در این رابطه K یک عدد ثابت و a، b، c، d، e و f پارامترهایی هستند که بر اساس نوع وسیله نقلیه تغییر می‌کنند. برای اطلاعات بیشتر درباره این پارامترها، خوانندگان می‌توانند به [Çimen and Soysal, 2017] مراجعه کنند. در ادامه برای محاسبه ET_{ij} می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$ET_{ij} = F * dis_{ij}$$

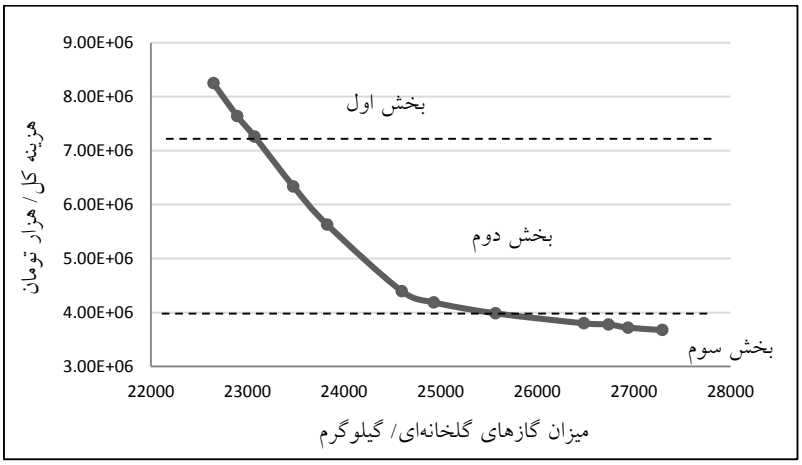
اطلاعات مربوط به وسایل نقلیه شامل ظرفیت، هزینه ثابت استفاده و ضرایب ثابت موجود در در رابطه‌ی (٣٦) در جدول ۸ نشان داده شده است.

پس از تشریح مطالعه موردی، مدل پیشنهادی به صورت جداگانه برای هر تابع هدف حل شده و دو نقطه حدی یعنی (۸۲٤۹۰۵۸، ۲۲٦٤۷/۳٤) و (۳٦۷۵۳۲۰/۲۹، ۲۷۲۹۳/٦۵) بدست آمد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

بهترین مقدار و بدترین مقدار تابع هدف دوم و همچنین فاصله بین کران بالا و پایین آن به ترتیب برابر ۲۲٦٤۷/۳٤، ۲۷۲۹۳/٦٥ و ٤٦٤٦/۳۱ است. با تقسیم این فاصله به ۱۱ فاصله مساوی و انتقال تابع هدف دوم به محدودیت‌ها، مدل با توجه به تابع هدف اول به عنوان هدف اصلی مساله در مدت ٦۷ دقیقه حل و ۱۲ نقطه پارتو محاسبه می‌شود. با توجه به شکل ۲ می‌توان نمودار پارتو را به سه بخش تقسیم کرد. اگر از نظر تصمیم گیرنده تابع هدف دوم یعنی میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده اهمیت داشته باشد، می‌توان از سه نقطه موجود در بخش اول نمودار استفاده کرد. همچنین در مواردی که تابع هدف اول یعنی هزینه‌های سیستم از اهمیت بیشتری برخوردار باشد میتوان از نقاط پارتوی موجود در بخش سوم نمودار استفاده کرد. بخش میانی نمودار نیز شامل نقاطی هست که بیشترین سازش بین هزینه‌ها و میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده برقرار است. مقادیر توابع هدف مربوط به هر جواب پارتو در جدول ۹ بیان شده است.

جدول۸. اطلاعات مربوط به ظرفیت، هزینه و ضرایب تابع گازهای گلخانه‌ای برای هر وسیله نقلیه

سطوح شبکه	ظرفیت وسایل نقلیه (دوز)	تعداد در دسترس	هزینه ثابت استفاده (هزارتومان)	K	a	b	c	d	e	f
سطح اول	۳۵۰۰۰۰	۱	۷۰	۸۷۱	-۱٦	۰/۱٤۳	۰	۰	۳۲۰۳۱	۰
(مرکز تولید)	۲٦۵۰۰۰	۷	۵۲	۱۱۰	۰	۰	۰/۰۰۰۳۷۵	۸۷۰۲	۰	۰
	۲٦۵۰۰۰	۱۰	۵۲	۱۱۰	۰	۰	۰/۰۰۰۳۷۵	۸۷۰۲	۰	۰
سطح دوم	۲٤۰۰۰۰	۱	٤۸	۱۱۰	۰	۰	۰/۰۰۰۳۷۵	۸۷۰۲	۰	۰
(مرکز توزیع)	۲۰۰۰۰۰	۱	۳۳	۱۱۰	۰	۰	۰/۰۰۰۳۷۵	۸۷۰۲	۰	۰
	۱۵۰۰۰۰	۱۰	۳۱	۱۱۰	۰	۰	۰/۰۰۰۳۷۵	۸۷۰۲	۰	۰



شکل ۲. مجموعه جوابهای کارای حاصل از روش محدودیت اپسیلون تکمیل شده

جدول ۹. مجموعه جوابهای کارای حاصل از روش محدودیت اپسیلون تکمیل شده

شماره	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	شماره	تابع هدف اول	تابع هدف دوم
۱	۸۲۴۹۰۵۸	۲۲۶۴۷/۳۴	۷	۴۱۸۷۴۳۷/۴۹	۲۴۹۳۰/۲۳
۲	۷۶۳۹۴۵۹/۰۶	۲۲۸۹۳/۵۰	۸	۳۹۸۵۳۹۴/۲۴	۲۵۵۶۹/۲۹
۳	۷۲۵۷۸۶۸/۹۷	۲۳۰۷۴/۰۴	۹	۳۸۰۰۳۴۰/۸۱	۲۶۴۸۳/۹۴
۴	۶۳۳۵۳۴۱/۷۳	۲۳۴۷۵/۷۲	۱۰	۳۷۷۸۵۶۷/۳۸	۲۶۷۳۹/۴۵
۵	۵۶۲۶۳۹۲/۵	۲۳۸۲۶/۱۶	۱۱	۳۷۲۰۷۴۹/۷۴	۲۶۹۳۸/۹۲
۶	۴۳۹۵۱۵۶/۳۴	۲۴۵۹۸/۳۰	۱۲	۳۶۷۵۳۲۰/۲۹	۲۷۲۹۳/۶۵

جدول ۱۰. نتایج مسیریابی برای جواب پارتوی شماره ۶

مرحله	دوره زمانی	مسیر بهینه
اول	۱	$m1 - d1 - m1$
	۲، ۳، ۴	$m1 - d1 - d2 - m1$
دوم	۱	$d1 - l2 - l8 - l7 - l5 - l4 - l1 - l3 - l6 - l11 - l10 - l9 - d1$
	۲	$d1 - l10 - l8 - l4 - l9 - d1$
		$d2 - l5 - l1 - l2 - l3 - l6 - l11 - l7 - d2$
	۳	$d1 - l2 - l11 - l7 - l5 - l9 - l8 - l10 - l6 - d1$
		$d2 - l1 - l3 - l4 - d2$
	۴	$d1 - l3 - d1$
		$d1 - l10 - d1$
		$d2 - l7 - l5 - l8 - l6 - l9 - l2 - l1 - l4 - l11 - d2$

جدول ۱۱. متوسط میزان واکسن تولیدی و متوسط میزان واکسن تحویل داده شده به مراکز توزیع و بیمارستان‌ها در دوره‌های زمانی مختلف

		آنفلوانزا				فلج اطفال			
	دوره / گره	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴
تولید	$m1$	۲۸۶۴۹/۹۵	۱۰۰۲۷۸/۸۵	۱۱۴۶۰۶/۷	۴۲۹۷۶/۶۵	۱۷۱۴۵۴/۶۵	۲۵۷۸۵۹/۹	۲۱۴۹۲۱/۲	۲۱۴۹۲۱/۲
	$d1$	۲۸۶۴۹/۹۵	۳۱۶۳۷/۶۵	۶۷۱۳۷	۹۷۳۰/۱۵	۱۷۱۴۵۴/۶۵	۸۰۲۲۰/۵۵	۴۸۶۴۸/۴۵	۴۸۶۴۸/۴۵
	$d2$	۰	۶۸۶۴۱/۲	۴۷۴۶۹/۷	۳۳۲۴۶/۵	۰	۱۷۷۶۳۹/۳۵	۱۶۶۲۷۲/۷۵	۱۶۶۲۷۲/۷۵
تحویل	$l1$	۴۴۵۸/۵۵	۱۵۶۰۳/۲	۱۷۸۳۳/۰۵	۶۶۸۷/۲۵	۲۶۷۴۹	۴۰۱۲۳/۵	۳۳۴۳۶/۲۵	۳۳۴۳۶/۲۵
	$l2$	۲۳۵۵/۲	۸۲۴۳/۲	۹۴۲۰/۸	۳۵۳۲/۸	۱۴۱۳۱/۲	۲۱۱۹۵/۶۵	۱۷۷۰۴/۲۵	۱۷۷۰۴/۲۵
	$l3$	۴۸۴۱/۵	۱۶۹۴۷/۵۵	۱۹۳۶۸/۳	۷۲۶۳/۴	۲۹۰۵۲/۴۵	۴۳۵۷۸/۱	۳۶۳۱۴/۷	۳۶۳۱۴/۷
	$l4$	۲۵۶۶/۸	۸۹۸۴/۹۵	۱۰۲۶۸/۳۵	۳۸۵۰/۲	۱۵۴۰۳/۱	۲۳۱۰۴/۶۵	۱۹۲۵۳/۳	۱۹۲۵۳/۳

l5	۱۴۰۶/۴۵	۴۹۲۴/۳	۵۶۲۶/۹۵	۲۱۱۰/۲۵	۸۴۴۱	۱۲۶۶۰/۳۵	۱۰۵۵۰/۱	۱۰۵۵۰/۱
l6	۲۲۶۶/۶۵	۷۹۳۱/۵۵	۹۰۶۵/۴۵	۳۳۹۹/۴	۱۳۵۹۷/۶	۲۰۳۹۶/۴	۱۶۹۹۷	۱۶۹۹۷
l7	۲۷۶۴/۶	۹۶۷۷/۲۵	۱۱۰۵۹/۵۵	۴۱۴۶/۹	۱۶۵۸۸/۷۵	۲۴۸۸۳/۷	۲۰۷۳۵/۶۵	۲۰۷۳۵/۶۵
l8	۳۹۵۹/۴۵	۱۳۸۵۸/۶۵	۱۵۸۳۸/۹۵	۵۹۳۹/۷۵	۲۳۳۰۴/۷۵	۳۵۶۳۶/۲	۲۹۶۹۶/۴۵	۲۹۶۹۶/۴۵
l9	۸۶۸/۲۵	۳۰۳۸/۳	۳۴۷۳	۱۳۰۱/۸	۵۲۰۸/۳۵	۷۸۱۳/۱	۶۵۱۱/۳	۶۵۱۱/۳
l10	۱۶۴۴/۵	۵۷۵۵/۷۵	۶۵۷۸	۲۴۶۶/۷۵	۹۸۶۷	۱۴۸۰۱/۶۵	۱۲۳۳۳/۷۵	۱۲۳۳۳/۷۵
l11	۱۵۱۸	۵۳۱۴/۱۵	۶۰۷۴/۳	۲۲۷۸/۱۵	۹۱۱۱/۴۵	۱۳۶۶۶/۶	۱۱۳۸۸/۴۵	۱۱۳۸۸/۴۵

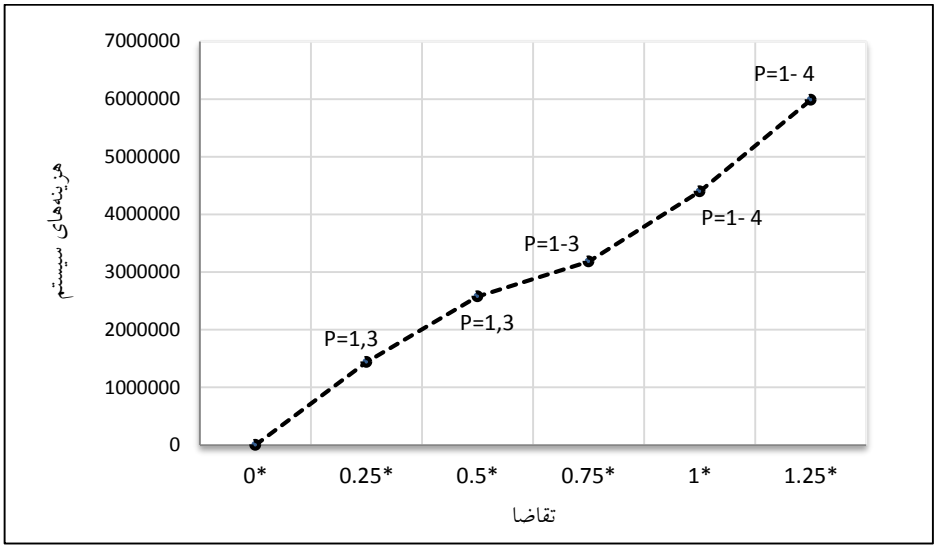
اگر تصمیم گیرنده برای هر دو تابع هدف اهمیت یکسانی قائل باشد، به جواب پارتوی شماره ۶ می‌رسیم که در ادامه این بخش به بررسی جزئی این جواب پرداخته می‌شود.

مسیرهای بهینه ارسال دارو در دو مرحله‌ی اول و دوم در جدول ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به اینکه عمر مفید واکسن آنفلوانزا شش ماه یا دو دوره زمانی و عمر مفید واکسن فلج اطفال چهار سال بوده و افق برنامه ریزی یک ساله در نظر گرفته شده است، در این مقاله تنها واکسن آنفلوانزا فساد پذیر در نظر گرفته شده‌است. با توجه به روند تولید در شرکت تولیدکننده در طول افق برنامه‌ریزی هیچ واکسنی فاسد نمی‌شود. جدول ۱۱ نیز نشان دهنده متوسط میزان بهینه تولید هر واکسن در هر دوره زمانی و متوسط میزان داروهای تحویل داده شده به مراکز توزیع و بیمارستانها است. سیاست بهینه به صورتی است که هیچ یک از بیمارستانها و مراکز توزیع دارو نگهداری نمی‌کنند.

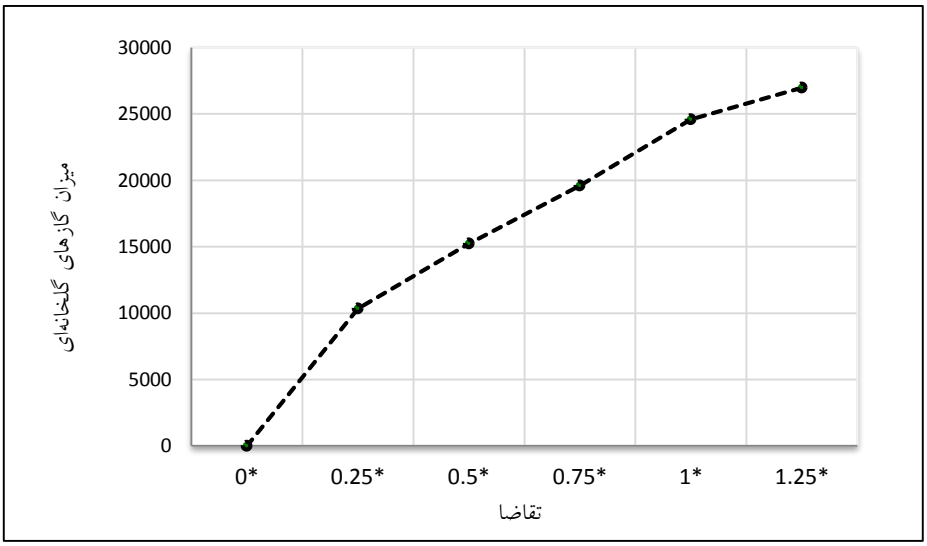
۶. تحلیل حساسیت

در این بخش به تحلیل حساسیت روی پارامترهای مساله پرداخته می‌شود. ابتدا اثر تغییرات میزان تقاضا بر توابع هدف بررسی می‌شود. اگر میزان تقاضا کم باشد، تولید داروی مورد نیاز می‌تواند در تعداد دوره‌های کمتری انجام شود، بنابراین هزینه‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی با کاهش مسیریابی در برخی دوره‌های زمانی، میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده نیز کاهش می‌یابد. اما از سوی دیگر با افزایش تقاضا، ممکن است تولید کننده در هر دوره تنها بتواند داروی مورد نیاز همان دوره را تولید نماید. در نتیجه هزینه‌های سیستم و میزان گازهای گلخانه‌ای افزایش می‌یابد. به منظور تحلیل حساسیت، پارامتر تقاضای در سناریوی اول در عددی بین [۲-۰] و با گام ۰,۲۵ ضرب می‌شود و سپس مدل مربوط به هر سناریو با استفاده از روش بهینه‌سازی مجموع وزندار با وزن ۰/۵ برای هر تابع هدف حل می‌شود. نمودارهای ۳ و ۴ نشان دهنده نتایج بدست آمده از تجزیه و تحلیل حساسیت بر روی پارامتر تقاضا است.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تقاضا، هزینه های سیستم و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش می‌یابد.



شکل ۳. اثر تغییرات تقاضا بر هزینه‌های سیستم (تابع هدف اول)



شکل ٤. اثر تغییرات تقاضا بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (تابع هدف دوم)

هزینه راه‌اندازی تولید دارو نیز یکی از پارامترهای مهم در زنجیره تامین سلامت است که تحلیل حساسیت آن می‌تواند منجر به ارائه‌ی نتایج ارزشمندی شود. به این منظور پارامتر هزینه راه‌اندازی در عددی بین [۲-۰] و با گام ۰,۲۵ ضرب شده و سپس مدل مربوط به هر سناریو حل می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت هزینه راه‌اندازی تولید در نمودارهای ۵ و ٦ نشان داده شده است. مشابه با حالت قبل اعداد روی نمودار نشان‌دهنده دوره‌هایی است که در آن تولید و ارسال دارو صورت می‌گیرد. . نتایج نشان می دهد که افزایش هزینه راه اندازی تولید موجب افزایش هزینه های سیستم و کاهش گازهای گلخانه ای می شود.

توصیه‌های مدیریتی: نمودار ۳ نشان‌دهنده تغییرات تابع هدف اول بر اساس افزایش تقاضا است. اعداد روی نمودار نیز نشان‌دهنده دوره هایی است که در آن تولید دارو و ارسال دارو

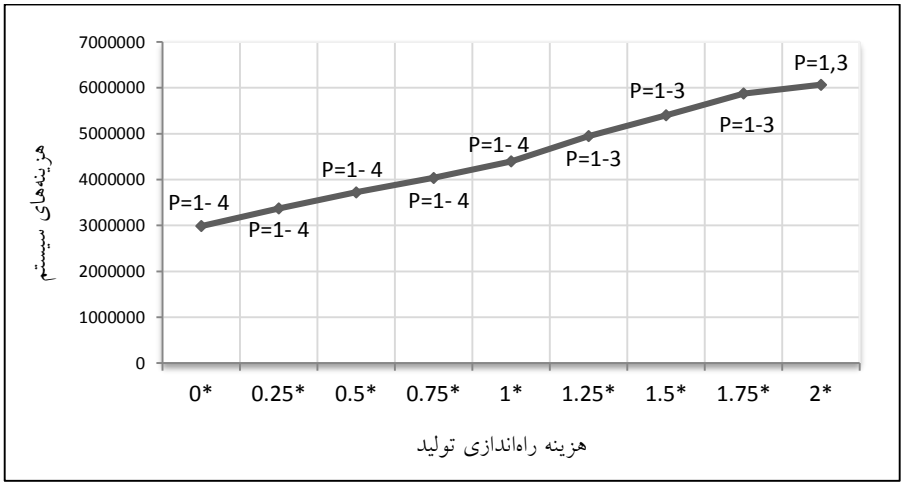
صورت می‌گیرد. همانطور که مشخص است زمانی که تقاضا به میزان ۲۵ درصد تقاضای فعلی کاهش یابد، مدیر تولید می‌تواند تمام داروهای مورد نیاز را در همان دوره اول تولید کند و به بیمارستانها ارسال نماید. اما اجرای این سیاست در عمل سبب فاسد شدن واکسنهای آنفلوانزا در دوره‌های سوم و چهارم می‌شود. بنابراین مدل به مدیریت تولید توصیه می‌کند برای جلوگیری از فاسدشدن واکسن‌ها، تولید در دو دوره اول و سوم انجام شود که منجر به کاهش توابع هدف به صورت همزمان خواهد شد. از سوی دیگر می‌توان گفت که با افزایش تقاضا به دلیل وجود محدودیت‌های تولید و یا نگهداری موجودی در بیمارستانها، مدل به مدیریت توصیه می کند که تولید و ارسال واکسنها باید در دوره های بیشتری انجام شود.

همانگونه که مشاهده می شود اگر تقاضای واکسنها به میزان ۱,۵ برابر تقاضای فعلی یا بیشتر افزایش یابد، تولید کننده قادر به پاسخگویی نبوده و در نتیجه مساله نشدنی خواهد بود. نمودار ۵ نشان‌دهنده تغییرات هزینه سیستم در اثر افزایش هزینه‌های راه‌اندازی تولید است. زمانی که هزینه راه‌اندازی ناچیز باشد، مدل به مدیریت توصیه می‌کند که برای جلوگیری از تحمیل هزینه‌های نگهداری و فساد، واکسن مورد نیاز هر دوره در همان دوره تولید و ارسال می‌شود و در نتیجه هزینه‌های کل سیستم کاهش می‌یابد. اما در صورتیکه هزینه های راه اندازی تولید افزایش یابد، مدل به مدیریت توصیه می‌کند که تقاضا در دوره های کمتری تولید شود که منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای خواهد شد.

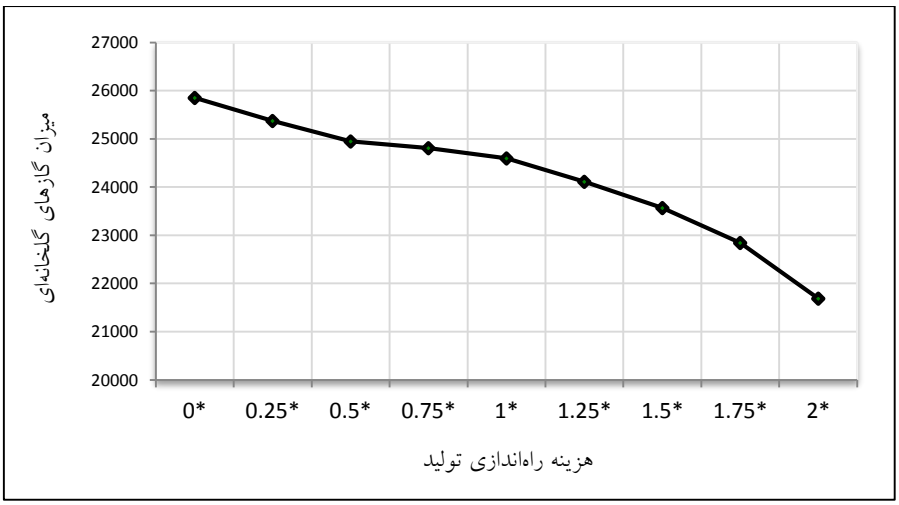
استفاده از رویکردهای گسسته و سلسله مراتبی در تصمیم‌گیری‌های زنجیره تامین، رسیدن به نقطه بهینه عمومی را تضمین نمی‌کند. به علاوه با توجه به متفاوت بودن مراجع تصمیم‌گیری احتمال بروز عدم هماهنگی بین اجزا بیشتر می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود که رویکرد یکپارچه مورد بررسی در این تحقیق در زنجیره تامین محصولات فسادپذیر به ویژه دارو پیاده‌سازی شود.

٦. نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شد تا با بهره‌گیری از یکی از روش‌های هماهنگ‌سازی در زنجیره تامین یعنی مساله یکپارچه تولید- موجودی- مسیریابی و ترکیب آن با مساله مسیریابی دو مرحله‌ای با مهم‌ترین چالش‌های زنجیره تامین دارو مقابله شود. به این منظور یک مدل برنامه‌ریزی دو هدفه جهت فرمول‌بندی مساله تولید-موجودی- مسیریابی یکپارچه محصولات دارویی در یک شبکه توزیع دو مرحله‌ای، چند محصولی، چند دوره‌ای و تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا ارائه شد. همچنین به منظور مدلسازی تقاضای غیرقطعی و مقابله با مشکل فقدان اطلاعات دقیق تقاضا از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استفاده شد.



شکل ۵. اثر تغییرات هزینه راه‌اندازی تولید بر هزینه‌های سیستم (تابع هدف اول)



شکل ٦. اثر تغییرات هزینه راه‌اندازی تولید بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (تابع هدف دوم)

همچنین با پیاده‌سازی مدل ریاضی پیشنهادی بر روی شبکه تولید و توزیع واکسن شرکت بایرپل فناور کارایی مدل مورد تایید قرار گرفت. جهت حل این مدل دو هدفه از روش محدودیت اپسیلون تکمیل شده استفاده و مجموعه‌ای شامل ۱۲ جواب کارای قوی برای مطالعه موردی حاصل شد. در انتها نیز تحلیل حساسیتی بر روی دو پارامتر مهم از شبکه تولید و توزیع صورت گرفت تا به تصمیم‌گیری در شرایط مختلف کمک کند.

اضافه نمودن سایر ویژگی‌ها به مساله نظیر حالت عدم قطعیت فازی یا حالت لجستیک معکوس می‌تواند زمینه‌ای برای تحقیقات آتی باشد. همچنین در نظر گرفتن توابع هدف دیگر نظیر توابع مرتبط با مسوولیت پذیری اجتماعی می‌تواند زمینه ای دیگر برای تحقیقات آتی باشد. همچنین با توجه به اینکه برنامه-ریزی تصادفی سناریو محور تنها به میانگین تابع هدف توجه داشته و به انحرافات از آن اهمیتی نمی‌دهد، استفاده از روش برنامه‌ریزی استوار سناریو محور یا سایر روش‌های بهینه‌سازی استوار برای مقابله با عدم قطعیت می‌تواند زمینه‌ای دیگر برای تحقیقات آتی باشد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Multi-echelon VRP
2. Satellites
3. Two-echelon Capacitated VRP
4. The ε-constraint method
5. payoff
6. Grid points
7. Augmented ε-constraint method
8. Lexicographic optimization

۸. مراجع

- بهشتی نیا، محمد علی، فیض، داود و سدادی، فاطیما (۱۳۹۷) "یکپارچگی مساله مسیریابی وسایل نقلیه با زمانبندی حمل‌ونقل و تولید در زنجیره‌تأمین"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۹، شماره ٤، ص ٥٤٩-٥٧٠.

-Adulyasak, Yossiri and Cordeau, Jean-François and Jans, Raf (2015) "The production routing problem: A review of formulations and

-Chen, Huey-Kuo, Hsueh, Che-Fu and Chang, Mei-Shiang (2009) "Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products", Computers & Operations Research, Vol. 36**,** No. 7, pp. 2311-2319.

-Çimen, Mustafa and Soysal, Mehmet (2017) "Time-dependent green vehicle routing problem with stochastic vehicle speeds: An approximate dynamic programming algorithm", Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 54, pp. 82-98.

-Crainic, Teodor Gabriel and Ricciardi, Nicoletta and Storchi, Giovanni (2009) "Models for evaluating and planning city logistics systems", Transportation Science, Vol. 43**,** No. 4, pp. 432-454.

-Devapriya, Priyantha, Ferrell, William and Geismar, Neil (2017) "Integrated production and distribution scheduling with a perishable product", European Journal of Operational Research, Vol. 259**,** No. 3, pp. 906-916.

-Grangier, Philippe, Gendreau, Michel, Lehuédé, Fabien and Rousseau, Louis-Martin (2016) "An adaptive large neighborhood search for the two-echelon multiple-trip vehicle routing problem with satellite synchronization", European Journal of Operational Research, Vol. 254**,** No. 1, pp. 80-91.

-Haimes, Y.Y and Chankong, Vira (1983) "Multiobjective decision making—theory and methodology", North Holland, New York.

-Jafarkhan, Fatemeh and Yaghoubi, Saeed (2017) "A robust mathematical model and heuristic solution algorithm for integrated production-routing-inventory problem of perishable products with lateral transshipment", Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems, Vol. 4**,** No. 8, pp. 195-211.

solution algorithms", Computers & Operations Research, Vol. 55, pp. 141-152.

-Armstrong, Ronald, Gao, Su and Lei, Lei (2008) "A zero-inventory production and distribution problem with a fixed customer sequence", Annals of Operations Research, Vol. 159**,** No. 1, pp. 395-414.

-Baldacci, Roberto, Mingozzi, Aristide and Roberti, Roberto and Calvo, Roberto Wolfler (2013) "An exact algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem", Operations Research, Vol. 61**,** No. 2, pp. 298-314.

-Beheshtinia, Mohammad Ali and Ghasemi, Amir (2017) "A multi-objective and integrated model for supply chain scheduling optimization in a multi-site manufacturing system ," Engineering Optimization, Vol. 50, No. 9, pp. 1415-1433.

-Beheshtinia, Mohammad Ali, Ghasemi, Amir and Farokhnia, Moein (2018) "Supply chain scheduling and routing in multi-site manufacturing system (case study: A drug manufacturing company)", Journal of Modelling in Management, Vol. 13**,** No. 1, pp. 27-49.

-Borumand, Ali and Beheshtinia, Mohammad Ali (2018) "A developed genetic algorithm for solving the multi-objective supply chain scheduling problem", Kybernetes, Vol. 47, No. 7, pp. 1401-1419.

-Chahed, Salma and Feillet, Dominique and Sahin, Evren and Dallery, Yves (2011) "The anti-cancer drug supply chain: A coupled production-distribution problem", Supply Chain Forum: An International Journal, Vol. 12**,** No. 1, pp. 22-30.

-Kalantari, Mohadeseh and Pishvaee, Mir Saman (2016) "A robust possibilistic programming approach to drug supply chain master planning", Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems, Vol. 4, No. 7, pp. 49-67.

-Karaoğlan, İsmail and Kesen, Saadettin Erhan (2017) "The coordinated production and transportation scheduling problem with a time-sensitive product: A branch-and-cut algorithm", International Journal of Production Research, Vol. 55, No. 2, pp. 536-557.

-Liao, Ching-Jong, Lin ,Yaoming and Shih, Stephen C. (2010) "Vehicle routing with cross-docking in the supply chain", Expert Systems with Applications, Vol. 37, No. 10, pp. 6868-6873.

-Masoumi, Amir H and Yu, Min and Nagurney, Anna (2012) "A supply chain generalized network oligopoly model for pharmaceuticals under brand differentiation and perishability", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 48, No. 4, pp. 762-780.

-Mavrotas, George (2009) "Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems", Applied Mathematics and Computation, Vol. 213, No. 2, pp. 455-465.

-Niakan, Farzad and Rahimi, Mohammad (2015) "A multi-objective healthcare inventory routing problem; a fuzzy possibilistic approach", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 80, pp. 74-94.

-Papageorgiou, Lazaros G. (2009) "Supply chain optimisation for the process industries: Advances and opportunities", Computers & Chemical Engineering, Vol. 33, No. 12, pp. 1931-1938.

-Perboli, Guido, Tadei, Roberto and Vigo, Daniele (2011) "The two-echelon capacitated vehicle routing problem: Models and math-based heuristics", Transportation Science, Vol. 45, No. 3, pp. 364-380.

-Qiu, Yuzhuo, Qiao, Jun and Pardalos, Panos M. (2016) "A branch-and-price algorithm for production routing problems with carbon cap-and-trade", Omega, Vol. 68, pp. 49-61

-Rezaeian, Javad, Haghayegh, Sepide and Mahdavi, Iraj (2016) "Designing an integrated production/distribution and inventory planning model of fixed-life perishable products", Journal of Optimization in Industrial Engineering, Vol. 9, No. 19, pp. 47-60.

-Santos, Fernando Afonso, Mateus, Geraldo Robson and da Cunha, Alexandre Salles (2014) "A branch-and-cut-and-price algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem", Transportation Science, Vol. 49, No. 2, pp. 355-368.

-Seyedhosseini, S. M. and Ghoreyshi, S. M. (2014) "An integrated model for production and distribution planning of perishable products with inventory and routing considerations", Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2014, pp. 1-10.

-Shah, Nilay (2004) "Pharmaceutical supply chains: Key issues and strategies for optimisation", Computers & Chemical Engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 929-941.

-Susarla, Naresh and Karimi, Iftekhar A. (2012) "Integrated supply chain planning for multinational pharmaceutical enterprises", Computers & Chemical Engineering, Vol. 42, pp. 168-177.

-Vahdani, Behnam, Niaki, STA and Aslanzade, S (2017) "Production-inventory-routing coordination with capacity and time window constraints for perishable products: Heuristic and meta-heuristic algorithms", Journal of Cleaner Production, Vol. 161, pp. 598-618

-Yantong, LI and Feng, Chu, Zhen, Yang and Calvo, Roberto Wolfler (2016) "A production inventory routing planning for perishable food with quality consideration", IFAC-PapersOnLine, Vol. 49, No. 3, pp. 407-412.

محمدعلی بهشتی‌نیا درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸٤ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۸۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مسیریابی، زنجیره تأمین و الگوریتم‌های فرا ابتکاری بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه دانشیاری در گروه صنایع دانشگاه سمنان است

نرجس سلم‌آبادی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹٤ از دانشگاه صنعتی بیرجند و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹٦ از دانشگاه سمنان اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مسیریابی وسایل نقلیه، بهینه‌سازی چند هدفه و بهینه‌سازی استوار است.