

# ارائه مدل ریاضی جامع به منظور برنامه‌ریزی تولید-توزیع یکپارچه در زنجیره تأمین حلقه بسته

رضا بابازاده\*

استادیار مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۲۰، تاریخ روایت اصلاح‌شده: ۹۶/۱۰/۲۰، تاریخ تصویب: ۹۶/۱۱/۲۷)

## چکیده

برنامه‌ریزی برای تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازیافت کالاها نقشی مهم در کاهش آثار زیان‌بار محیط‌زیستی صنایع مختلف ایفا می‌کند. برای این منظور پژوهشگران مدل‌های ریاضی مفیدی برای برنامه‌ریزی زنجیره‌های تأمین مستقیم و معکوس در سال‌های اخیر توسعه داده‌اند. عمده مدل‌های ارائه‌شده در این حوزه برنامه‌ریزی راهبردی در زنجیره‌های تأمین مستقیم و معکوس را پوشش داده‌اند و کمتر به برنامه‌ریزی میان‌مدت یا کوتاه‌مدت پرداخته‌اند. در این مقاله، مدلی جامع و یکپارچه برای برنامه‌ریزی تولید و توزیع در زنجیره تأمین حلقه بسته توسعه داده شده است. در زنجیره تأمین حلقه بسته مورد بحث، مشتریان به سه گروه مشتریان محصول جدید، مشتریان محصول بازیافتی و مشتریان محصولات مواد اولیه تقسیم می‌شوند. به دلیل کاهش هزینه‌های احداث، مراکز تولید و بازیافت به صورت مراکز ترکیبی تولید/بازیافت، و مراکز توزیع و بازتوزیع محصولات بازیافتی به صورت مراکز ترکیبی توزیع/بازتوزیع در نظر گرفته می‌شوند. نتایج حل مدل پیشنهادی قابلیت آن را برای برنامه‌ریزی تولید و توزیع یکپارچه در زنجیره‌های تأمین حلقه بسته نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌ریزی تولید و توزیع، برنامه‌ریزی میان‌مدت، زنجیره تأمین حلقه بسته، مدل برنامه‌ریزی ریاضی، لجستیک مستقیم و معکوس.

## مقدمه

شایان ذکر است در برخی منابع، مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته با مدیریت زنجیره تأمین سبز به طور معادل به کار می‌روند. هدف زنجیره تأمین سبز، بهبود تمام فعالیت‌های محیط‌زیستی و اجتماعی زنجیره تأمین در کنار اهداف اقتصادی است. درحالی‌که می‌توان زنجیره تأمین حلقه بسته را شاخه‌ای از زنجیره تأمین سبز در نظر گرفت که به مدیریت جمع‌آوری و بازیافت کالاها می‌پردازد.

برنامه‌ریزی در این حوزه در سه بخش راهبردی (بلندمدت)، تاکتیکی (میان‌مدت) و عملیاتی (کوتاه‌مدت) دسته‌بندی می‌شود [۳]. در برنامه‌ریزی راهبردی در مورد مقوله‌هایی مانند احداث تسهیلات و ظرفیت آن‌ها، راهبرد فروش و رقابت، انتخاب تأمین‌کننده‌ها و برنامه تجاری سازمان تصمیم‌گیری می‌شود. در برنامه‌ریزی تاکتیکی، به مسائلی از قبیل برنامه‌ریزی اصلی تولید، برنامه‌ریزی لجستیک و نحوه توزیع و جمع‌آوری، برنامه‌ریزی بازیافت

امروزه به دنبال تغییر توسعه اقتصادی بنگاه‌ها به توسعه پایدار که در آن اهداف اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی هم‌زمان بهبود می‌یابند، فعالیت‌های لجستیک معکوس و زنجیره تأمین مستقیم-معکوس بیش‌ازپیش مدنظر پژوهشگران قرار گرفته است [۱]. زنجیره‌های تأمین حلقه بسته، ساختار لجستیکی صنایعی را بیان می‌کنند که کالاهای آن‌ها قابل تعمیر و بازیافت است. صنایع الکترونیک و اتومبیل نمونه‌هایی از این ساختار هستند. زنجیره‌های تأمین مستقیم-معکوس ساختار لجستیکی صنایعی را نشان می‌دهند که کالاها پس از جمع‌آوری منهدم، یا به مواد اولیه تبدیل شده‌اند و در صنایع دیگر کاربرد داشته‌اند. درواقع در این حالت، جریان بازگشتی کالاها وارد جریان مستقیم کالاها نمی‌شود. مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته شامل برنامه‌ریزی برای تولید، توزیع، جمع‌آوری، بازیافت و بازتوزیع کالاهای بازیافتی است [۲].

فلاح‌تفتی و همکاران [۸] رویکردی چندهدفه را بر مبنای برنامه‌ریزی امکانی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت توسعه دادند. اوزیلان [۹] رویکردی چندهدفه را براساس برنامه‌ریزی فازی تعاملی و به‌منظور برنامه‌ریزی یکپارچه راهبردی و تاکتیکی زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت ارائه داد. مدل ارائه‌شده در این مقاله، برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط است که به‌کمک نرم‌افزارهای تجاری حل می‌شود. وحدانی و همکاران [۱۰] به‌کارگیری مدل برنامه‌ریزی امکانی شانس را برای طراحی استوار شبکه زنجیره تأمین حلقه با توجه به شرایط عدم قطعیت مطالعه کردند. رویکرد ارائه‌شده در این مقاله هنگامی استفاده می‌شود که عدم قطعیت داده‌ها به‌صورت بازه‌ای بیان شوند. رضانی و همکاران [۱۱] رویکرد تصادفی چندهدفه جدیدی برای طراحی شبکه لجستیک مستقیم و معکوس با هدف بهبود پاسخگویی و کیفیت محصولات در شرایط عدم قطعیت توسعه دادند.

در مدل‌هایی که به بهینه‌سازی یکپارچه برنامه‌ریزی راهبردی و تاکتیکی در زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته شده است، عمدتاً تصمیم‌های دوره میان‌مدت به‌صورت کامل مدل‌سازی نشده است؛ زیرا هدف اصلی این مدل‌ها از به‌کارگیری تصمیم‌های میان‌مدت در مدل‌سازی، تعیین بهینه تصمیم‌های راهبردی است.

ترابی و هسینی [۱۲] یک مدل ریاضی چندهدفه را به‌منظور یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تأمین مواد اولیه و توزیع با برنامه‌ریزی تولید در صنعت اتومبیل‌سازی ارائه کردند. لئیونگ و همکاران [۱۳] نیز مدل برنامه‌ریزی استوار مبتنی بر سناریو را به‌منظور برنامه‌ریزی تولید با هدف حداقل کردن هزینه‌های تولید، نیروی کار و موجودی در شرایط عدم قطعیت توسعه دادند. قاسمی یقین و همکاران [۱۴] رویکردی جدید بر مبنای قیمت‌گذاری در برنامه‌ریزی تولید ارائه کردند. مدل ارائه‌شده مدلی غیرخطی است که در آن تقاضای محصولات تابعی از هزینه‌های تبلیغات و قیمت محصولات در نظر گرفته می‌شود. جمال‌نیا و سخکیان [۱۵] مدل غیرخطی چندهدفه فازی را برای مسئله برنامه‌ریزی تولید با هدف کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت توسعه دادند و به تأثیر یادگیری نیروی کار بر برنامه‌ریزی تولید توجه

و انهدام در میان‌مدت، مثلاً در بازه سه ماه تا یک سال پرداخته می‌شود. در برنامه‌ریزی عملیاتی، درمورد زمان‌بندی عملیات و بهینه‌سازی عملیات کف کارگاهی در لایه‌های مستقیم و معکوس زنجیره تأمین حلقه بسته در کوتاه‌مدت، مثلاً در بازه یک تا چند روز تصمیم‌گیری می‌شود. بهترین رویکرد برنامه‌ریزی حالتی است که همه سطوح راهبردی، تاکتیکی و عملیاتی در زنجیره تأمین به‌صورت یکپارچه بهینه شوند، اما به‌دلیل پیچیدگی مسئله، غالباً این سطوح به‌صورت جداگانه اما وابسته برنامه‌ریزی می‌شوند. وابسته به این معنا که خروجی برنامه‌ریزی سطح راهبردی به‌عنوان ورودی برنامه‌ریزی سطح تاکتیکی و خروجی برنامه‌ریزی سطح تاکتیکی به‌منزله ورودی برنامه‌ریزی سطح عملیاتی در نظر گرفته می‌شوند.

اگرچه برنامه‌ریزی جداگانه برای زنجیره‌های تأمین مستقیم و معکوس با پیچیدگی کمتری مواجه است، به‌دلیل تأثیر فراوان جریان کالاهای مستقیم و معکوس بر یکدیگر و جلوگیری از پاسخ‌های زیر بهینه، برنامه‌ریزی یکپارچه مستقیم-معکوس سبب کاهش هزینه‌های غیرضروری احداث تسهیلات بیشتر و ظرفیت‌سازی می‌شود [۴]. تاکنون پژوهشگران، مدل‌های ریاضی گسترده‌ای در حوزه لجستیک معکوس و زنجیره تأمین مستقیم-معکوس ارائه کرده‌اند. بیشتر مقاله‌های ارائه‌شده در این حوزه، برنامه‌ریزی راهبردی را پوشش داده‌اند. مقاله‌های ارائه‌شده در حوزه برنامه‌ریزی تاکتیکی و عملیاتی نادر است. در ادامه مقاله‌های مرتبط با این حوزه و زمینه برنامه‌ریزی تولید و توزیع مرور می‌شوند.

پیشوایی و همکاران [۵] یک مدل ریاضی را برای طراحی شبکه زنجیره تأمین مستقیم-معکوس در شرایط عدم قطعیت ارائه کردند. در این مقاله، از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مبتنی بر سناریو برای مقابله با عدم قطعیت استفاده شد. ایسواران و استر [۶] یک مدلی ریاضی را برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته توسعه دادند و از الگوریتم تجزیه بندرز برای حل مسئله در سائز بزرگ استفاده کردند. پیشوایی و همکاران [۷] از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت استفاده کردند.

### مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و توزیع برای زنجیره تأمین حلقه بسته، مدلی برای شبکه‌ای با چند مکان، چندلایه، چند مد حمل‌ونقل، چند دوره و چند محصول است. در شکل ۱ ساختار شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی آمده است. خطوط تیره جریان کالاهای استفاده‌شده و بازیافت‌شده و خطوط مستقیم جریان مستقیم کالاهای جدید را نشان می‌دهند. ساختار مدل پیشنهادی در صنایعی مانند ساخت دوربین عکاسی، کامپیوتر و پرینتر کاربرد دارد. در این میان می‌توان محصولات جمع‌آوری‌شده را با تغییرات اندک به‌عنوان محصولات بازیافتی در بازار مشتریان این محصولات فروخت.

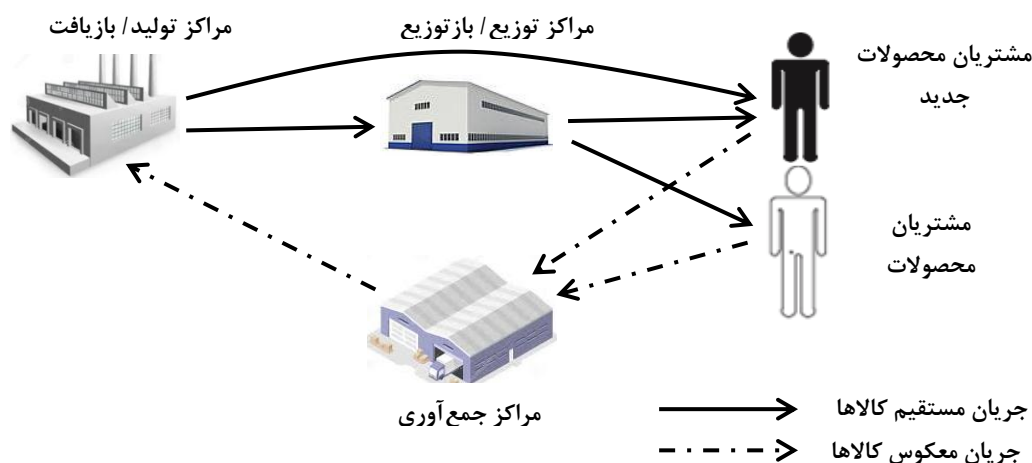
با توجه به شکل ۱، محصولات جدید و بازیافتی در مراکز ترکیبی تولید/بازیافت تولید و به مراکز ترکیبی توزیع/بازتوزیع ارسال می‌شوند. شایان ذکر است که در نظر گرفتن مراکز ترکیبی تولید/بازیافت یا مراکز ترکیبی توزیع/بازتوزیع سبب کاهش هزینه‌ها در ساختار شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته می‌شود [۵]. همچنین می‌توان محصولات جدید را به‌صورت مستقیم علاوه‌بر انتقال از طریق مراکز توزیع/بازتوزیع، در زمان تحویل مدنظر مشتریان برای آن‌ها ارسال کرد. در مراکز ترکیبی توزیع/بازتوزیع، قسمتی از کالاها ذخیره می‌شود و ارسال بقیه کالاها به مراکز مشتریان با مدهای گوناگون حمل‌ونقل صورت می‌گیرد. همچنین مقداری از کالاها با عنوان ذخیره احتیاطی در این مراکز برای جلوگیری از تغییرات برنامه‌ریزی‌نشده در نظر گرفته می‌شود.

اولویت مشتریان محصولات جدید در تخصیص منابع، بیشتر از مشتریان کالاهای بازیافت‌شده است؛ بنابراین حمل مستقیم کالاها و نگهداری ذخیره احتیاطی تنها برای کالاهای جدید در نظر گرفته می‌شود. محصولات جدید در قالب سیستم کششی و محصولات بازیافتی در قالب سیستم فشاری به مشتریان تحویل داده می‌شود که مواد اولیه آن با جمع‌آوری محصولات استفاده‌شده فراهم می‌شود. سیستم فشاری به دلیل محدود بودن محصولات، جمع‌آوری شده است؛ بنابراین ممکن است برخی تقاضاهای محصولات بازیافتی برآورده نشود.

لئو و پاپاجورج [۱۶] مدل ریاضی چندهدفه‌ای را به‌منظور برنامه‌ریزی تولید، توزیع و ظرفیت برای زنجیره تأمین در کلاس جهانی ارائه دادند و اهداف حداقل‌سازی هزینه‌ها، حداقل‌سازی زمان حمل و حداقل‌سازی فروش ازدست‌رفته را در نظر گرفتند. سمپایو [۱۷] مسئله برنامه‌ریزی تولید انعطاف‌پذیر را در طول افق برنامه‌ریزی مشخص بررسی کرد. هایجون و همکاران [۱۸] مدل یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی را به‌منظور بهینه‌کردن زمان بازتولید قطعات بازیافتی ارائه دادند و سپس از الگوریتم شبیه‌سازی، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله استفاده کردند. کیم و گلاک [۱۹] مسئله برنامه‌ریزی تولید را برای سیستم‌های تولید دومرحله‌ای با چندین ماشین موازی و نرخ تولید متغیر بررسی کردند. هدف آن‌ها بهینه‌سازی تصمیم‌های تاکتیکی تولید و توزیع بود. گویندان و همکاران [۲۰] ادبیات جامعی ارائه کردند که ضمن بررسی مقاله‌های موجود در زمینه زنجیره تأمین معکوس و حلقه بسته، پژوهش‌های آتی در این زمینه را به‌خوبی بیان می‌کند.

مدل‌های ارائه‌شده در حوزه برنامه‌ریزی تولید، اغلب برای زنجیره‌های تأمین مستقیم ارائه شده و به‌ندرت در آن‌ها برنامه‌ریزی توزیع یکپارچه شده است.

براساس دانش ما، تاکنون مدل ریاضی جامعی برای برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و توزیع برای زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه نشده است؛ بنابراین در پژوهش حاضر، به‌منظور پرکردن شکاف ادبیات، مدل ریاضی جامع برای مدل‌سازی برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و توزیع در زنجیره تأمین حلقه بسته توسعه داده شد. در مدل ارائه‌شده، شرایط چندمحصولی، چند مد حمل‌ونقل، چند دوره و چند گروه مشتریان برای زنجیره تأمین حلقه بسته در نظر گرفته می‌شود. هدف اصلی این پژوهش تمرکز بر مدل‌سازی تصمیم‌های اصلی برنامه‌ریزی تولید و توزیع است که جزء تصمیم‌های تاکتیکی محسوب می‌شود. همچنین از پرداختن به مباحث برنامه‌ریزی ظرفیت که از مسائل حوزه راهبردی است اجتناب می‌شود. این مدل می‌تواند در صنایعی مانند الکترونیک و لاستیک به‌خوبی استفاده شود.



شکل ۱. ساختار شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته

و سایر هزینه‌های مرتبط با تصمیمات راهبردی صرف نظر می‌شود.

تصمیم‌گیری اصلی تاکتیکی (میان‌مدت) که به کمک مدل پیشنهادی صورت می‌گیرد، می‌تواند مرجعی در برنامه‌ریزی اصلی باشد. این تصمیم‌ها عبارت‌اند از:

۱. تصمیم‌های برنامه‌ریزی بازیافت و تولید: تعیین مقدار محصولات جدید و بازیافتی در هر دوره که به کمک مراکز ترکیبی تولید/بازیافت پردازش می‌شوند.

۲. تصمیم‌های برنامه‌ریزی توزیع و بازتوزیع: تعیین مقدار و مد حمل محصولاتی که میان لایه‌های گوناگون زنجیره تأمین حلقه بسته در حالت مستقیم و معکوس در هر دوره منتقل می‌شود.

۳. تصمیم‌های برنامه‌ریزی خرید و جمع‌آوری: تعیین مقدار محصولات مصرف‌شده و کهنه که باید از مشتریان گروه اول و دوم در هر دوره خریداری و جمع‌آوری شود.

۴. تصمیم‌های برنامه‌ریزی فروش: تعیین مقدار کالاهای جدید، کالاهای بازیافتی و کالاهای غیرقابل بازیافتی که در هر دوره به مشتریان متعدد فروخته می‌شود.

در ادامه، اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهایی که در مدل‌سازی ریاضی مسئله برنامه‌ریزی تولید و توزیع جمعیتی پیشنهادی استفاده می‌شوند، تشریح می‌شود.

پس از جمع‌آوری محصولات مصرف‌شده از مشتریان، این محصولات به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شوند که پس از تست و ارزیابی کیفیت آن‌ها، به دو گروه قابل بازیافت و غیرقابل بازیافت تقسیم و محصولات قابل بازیافت به مراکز ترکیبی ساخت/بازیافت ارسال می‌شوند. محصولات غیرقابل بازیافت را نیز مشتریان مواد اولیه خریداری می‌کنند. در مدل پیشنهادی، زمان تحویل کالاها به مشتریان براساس سطح سرویس تعریف‌شده با مدیریت ارشد تغییر می‌کند؛ برای مثال، مشتری‌ای با سطح سرویس ۱۰۰ درصد، تمام کالاهای درخواستی خود را در زمان مورد نظر دریافت می‌کند.

در تابع هدف مدل پیشنهادی، ارزش فعلی خالص سود کل که از کاهش هزینه‌های کل از درآمد کل به دست می‌آید حداکثر می‌شود. درآمد کل با فروش کالاهای جدید و کالاهای بازیافتی به مشتریان گروه اول و دوم و فروش کالاهای غیرقابل بازیافت به مشتریان مواد اولیه به دست می‌آید. هزینه‌های کل نیز شامل هزینه‌های تولید، بازیافت، حمل‌ونقل، خرید محصولات بازیافتی (کهنه) از مشتریان، تست و ارزیابی کیفیت محصولات جمع‌آوری‌شده، نگهداری موجودی و هزینه‌های تبلیغات است. با توجه به اینکه هدف، تعیین تصمیم‌های راهبردی است، از هزینه‌های باز و بسته‌کردن تسهیلات، هزینه‌های انتخاب تأمین‌کنندگان

		اندیس‌ها
قیمت فروش هر واحد محصول غیرقابل‌بازیافت	$Pr3_{pt}$	$I$ اندیس مراکز ترکیبی ساخت/بازیافت ( $i=1, \dots, I$ )
$p$ به مشتریان مواد خام در دوره $t$		$J$ اندیس مراکز ترکیبی توزیع/بازتوزیع ( $j=1, \dots, J$ )
قیمت خرید هر واحد محصول کهنه $p$ از مشتری $k$ در دوره $t$	$Pur1_{kpt}$	$K$ اندیس مشتریان محصولات جدید (گروه اول) ( $k=1, \dots, K$ )
قیمت خرید هر واحد محصول کهنه $p$ از مشتری $l$ در دوره $t$	$Pur2_{lpt}$	$L$ اندیس مشتریان محصولات بازیافت‌شده (گروه دوم) ( $l=1, \dots, L$ )
هزینه تولید هر واحد محصول جدید $p$ در مرکز تولید/بازیافت $i$ در دوره $t$	$Pc_{ipt}$	$M$ اندیس مراکز جمع‌آوری محصولات کهنه (استفاده‌شده) ( $m=1, \dots, M$ )
هزینه بازیافت هر واحد محصول کهنه $p$ در مرکز تولید/بازیافت $i$ در دوره $t$	$Rc_{ipt}$	$N$ اندیس مد حمل‌ونقل ( $n=1, \dots, N$ )
هزینه پردازش و تست کیفیت هر واحد محصول کهنه $p$ در مرکز جمع‌آوری $m$ در دوره $t$	$Hpc_{mpt}$	$P$ اندیس نوع محصول ( $p=1, \dots, P$ )
هزینه نگهداری هر واحد محصول جدید $p$ در مرکز توزیع/بازتوزیع $j$ در دوره $t$	$Hic1_{jpt}$	$T$ اندیس دوره زمانی ( $t=1, \dots, T$ )
هزینه نگهداری هر واحد محصول کهنه $p$ در مرکز توزیع/بازتوزیع $j$ در دوره $t$	$Hic2_{jpt}$	
هزینه کمبود هر واحد محصول کهنه $p$ در منطقه مشتری $l$ در دوره $t$	$sc_{lpt}$	
هزینه تبلیغات هر واحد محصول جدید $p$ در منطقه مشتری $k$ در دوره $t$	$Ha1_{kpt}$	
هزینه تبلیغات هر واحد محصول کهنه $p$ در منطقه مشتری $l$ در دوره $t$	$Ha2_{lpt}$	
نرخ بهره بانکی	$r$	
حداکثر مقدار بودجه برای کارهای تبلیغاتی در دوره $t$	$BC_t$	
هزینه حمل هر واحد محصول جدید $p$ از مرکز تولید/بازیافت $i$ به مرکز توزیع $j$ به وسیله مد حمل $n$ در دوره $t$	$Tc_{ijnpt}$	
هزینه حمل هر واحد محصول جدید $p$ از مرکز تولید/بازیافت $i$ به مشتری $k$ به کمک مد حمل $n$ در دوره $t$	$Tc1_{iknpt}$	
هزینه حمل هر واحد محصول جدید $p$ از مرکز تولید/بازیافت $i$ به مشتری $k$ به کمک مد حمل $n$ در دوره $t$	$Tc2_{jknpt}$	
هزینه حمل هر واحد محصول کهنه $p$ از مرکز توزیع/بازتوزیع $j$ به مشتری $l$ به کمک مد حمل $n$ در دوره $t$	$Tc3_{jlnpt}$	
		پارامترها
		$DI_{kpt}$ تقاضای مشتری $k$ برای محصول جدید نوع $p$ در دوره $t$
		$D2_{lpt}$ تقاضای مشتری $l$ برای محصول بازیافت‌شده نوع $p$ در دوره $t$
		$Re1_{kpt}$ مقدار بازگشتی محصول نوع $p$ از مشتری $k$ در دوره $t$
		$Re2_{lpt}$ مقدار بازگشتی محصول نوع $p$ از مشتری $l$ در دوره $t$
		$\beta1_p$ درصد قابل بازیافت محصول $p$ که از مشتریان گروه اول $k$ در دوره $t$ جمع‌آوری می‌شود.
		$\beta2_p$ درصد قابل بازیافت محصول $p$ که از مشتریان گروه دوم $l$ در دوره $t$ جمع‌آوری می‌شود.
		$SS1_{jpt}$ سطح ذخیره احتیاطی محصول جدید $p$ در مرکز توزیع/بازتوزیع $j$ در دوره $t$
		$Pr_{jknpt}$ قیمت فروش هر واحد محصول جدید $p$ از مرکز توزیع/بازتوزیع $j$ به مشتری $k$ به وسیله مد حمل $n$ در دوره $t$
		$Pr1_{iknpt}$ قیمت فروش هر واحد محصول جدید $p$ از مرکز تولید/بازیافت $i$ به مشتری $k$ به کمک مد حمل $n$ در دوره $t$
		$Pr2_{jlnpt}$ قیمت فروش هر واحد محصول بازیافت‌شده $p$ از مرکز توزیع/بازتوزیع $j$ به مشتری $l$ به کمک مد حمل $n$ در دوره $t$

متغیرهای تصمیم		
$x_{jknpt}$	مقدار محصولات جدید نوع $p$ که از مرکز توزیع $i$ بازتوزیع $j$ به مرکز مشتری $k$ به کمک مد حمل $n$ در دوره $t$ ارسال می‌شود	$Tc4_{kmpt}$ هزینه حمل هر واحد محصول کهنه $p$ از مرکز مشتری $k$ به مرکز جمع‌آوری $m$ در دوره $t$
$xI_{iknpt}$	مقدار محصولات جدید نوع $p$ که از مرکز تولید $i$ باز یافت $i$ به مرکز مشتری $k$ از طریق مد حمل $n$ در دوره $t$ ارسال می‌شود	$Tc5_{lmpt}$ هزینه حمل هر واحد محصول کهنه $p$ از مرکز مشتری $l$ به مرکز جمع‌آوری $m$ در دوره $t$
$x2_{jlnpt}$	مقدار محصولات باز یافتی نوع $p$ که از مرکز توزیع $i$ بازتوزیع $j$ به مرکز مشتری $k$ به کمک مد حمل $n$ در دوره $t$ ارسال می‌شود	$Tc6_{mipt}$ هزینه حمل هر واحد محصول کهنه $p$ از مرکز جمع‌آوری $m$ به مرکز تولید $i$ باز یافت $i$ در دوره $t$
$x3_{ijmpt}$	مقدار محصولات جدید نوع $p$ که از مرکز تولید $i$ باز یافت $i$ به مرکز توزیع $j$ به وسیله مد حمل $n$ در دوره $t$ ارسال می‌شود	$Td_{ikn}$ زمان تحویل از مرکز تولید $i$ باز یافت $i$ به مرکز مشتری $k$ به کمک مد حمل $n$
$x4_{ijmpt}$	مقدار محصولات باز یافتی نوع $p$ که از مرکز تولید $i$ باز یافت $i$ به مرکز توزیع $j$ به کمک مد حمل $n$ در دوره $t$ ارسال می‌شود	$Te_{kp}$ زمان تحویل مورد انتظار مشتری $k$ برای محصول جدید $p$
$xe_{ipt}$	مقدار محصولات جدید نوع $p$ که در مرکز تولید $i$ باز یافت $i$ در دوره $t$ تولید می‌شود	$Te1_{lp}$ زمان تحویل مدنظر مشتری $l$ برای محصول کهنه $p$
$y_{kmp}$	مقدار محصولات بازگشتی نوع $p$ که از مرکز مشتری $k$ به مرکز جمع‌آوری $m$ در دوره $t$ ارسال می‌شود	$Td1_{jkn}$ زمان تحویل از مرکز توزیع $j$ به مرکز مشتری $k$ از طریق مد حمل $n$ (برحسب روز)
$y1_{lmpt}$	مقدار محصولات بازگشتی نوع $p$ که از مرکز مشتری $l$ به مرکز جمع‌آوری $m$ در دوره $t$ ارسال می‌شود	$Td2_{jln}$ زمان تحویل از مرکز توزیع $j$ به مرکز مشتری $l$ به کمک مد حمل $n$ (برحسب روز)
$y2_{pt}$	مقدار محصولات غیرقابل باز یافت نوع $p$ که در دوره $t$ به مشتریان مواد اولیه فروخته می‌شود	$Sl1_k$ سطح سرویس تعریف شده برای مشتری $k$ از طریق مدیریت ارشد
$y3_{mipt}$	مقدار محصولات قابل باز یافت نوع $p$ که از مرکز جمع‌آوری $m$ به مرکز تولید $i$ باز یافت $i$ در دوره $t$ ارسال می‌شود	$Sl2_l$ سطح سرویس تعریف شده برای مشتری $l$ به وسیله مدیریت ارشد
$Rp_{pt}$	مقدار محصولات قابل باز یافت نوع $p$ در دوره $t$ سطح موجودی محصول جدید نوع $p$ در مرکز توزیع $j$ در دوره $t$	$b_p$ حجم مورد نیاز هر واحد محصول نوع $p$ برای نگهداری (مترمکعب)
$IC1_{jpt}$	سطح موجودی محصول باز یافتی نوع $p$ در مرکز توزیع $j$ در دوره $t$	$b1_p$ ظرفیت لازم برای تولید هر واحد محصول جدید نوع $p$ (واحد/ماشین-ساعت) در مراکز تولید/باز یافت
$IC2_{jpt}$	سطح موجودی محصول باز یافتی نوع $p$ در مرکز توزیع $j$ در دوره $t$	$b2_p$ ظرفیت لازم برای باز یافت هر واحد محصول کهنه نوع $p$ (واحد/ماشین-ساعت) در مراکز تولید/باز یافت
$\lambda_{lpt}$	مقدار کمبود محصول باز یافتی نوع $p$ در مرکز مشتری $l$ در دوره $t$	$b3_p$ ظرفیت لازم برای پردازش هر واحد محصول کهنه نوع $p$ (واحد/ماشین-ساعت) در مراکز جمع‌آوری
		$Ca1_i$ حداکثر ظرفیت مرکز تولید $i$ باز یافت $i$ برای فعالیت تولیدی و باز یافتی
		$Ca2_j$ حداکثر ظرفیت مرکز توزیع $j$ بازتوزیع $j$ برای فعالیت توزیع/بازتوزیع
		$Ca3_m$ حداکثر ظرفیت مرکز جمع‌آوری $m$ برای فعالیت پردازش و تست کیفیت محصولات جمع‌آوری شده

کالاهای قابل‌باز یافت از مراکز جمع‌آوری به مراکز تولید/باز یافت ارسال می‌شوند. محدودیت ۱۳ بیان می‌کند ارسال کالاهای قابل‌باز یافت، پس از باز یافت به مراکز توزیع/باز توزیع صورت می‌گیرد. محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵ تضمین می‌کنند مشتریان محصولات جدید در موعد مقرر آن‌ها را دریافت می‌کنند. ممکن است کالاها به‌طور مستقیم از مراکز تولید/باز یافت (محدودیت ۱۴) یا مراکز توزیع/باز توزیع (محدودیت ۱۵) بر اساس سطح سرویس از پیش تعریف‌شده به مشتریان تحویل شوند. با توجه به محدودیت ۱۶، تضمین می‌شود که مشتریان کالاهای باز یافت‌شده بر اساس سطح سرویس از پیش تعریف‌شده و به‌کمک مراکز توزیع/باز توزیع کالاهای خود را دریافت می‌کنند. محدودیت ۱۷ حداکثر ظرفیت موجود برای تولید کالاهای جدید و باز یافت کالاهای کهنه در هر مرکز تولید/باز یافت را بیان می‌کند. محدودیت‌های ۱۸ و ۱۹ به ترتیب حداکثر ظرفیت موجود برای توزیع کالاها در مراکز توزیع/باز توزیع و جمع‌آوری کالاها در مراکز جمع‌آوری در هر دوره را نشان می‌دهند. بر اساس محدودیت ۲۰، میزان حمل مستقیم کالاها از مراکز تولید/باز یافت به مراکز مشتریان محصولات جدید به دلیل گران بودن هزینه حمل محدود است. محدودیت ۲۱ حداکثر بودجه تخصیص داده شده برای انجام فعالیت‌های تبلیغاتی در هر دوره را نشان می‌دهد. محدودیت ۲۲ نیز شرط مثبت بودن متغیرهای تصمیم را بیان می‌کند.

#### نتایج محاسباتی

در این قسمت به منظور ارزیابی مدل پیشنهادی، مثال عددی که از مقاله‌های ادبیات موضوع انتخاب شده است بررسی و برای این کار از نرم‌افزار Lingo 11.0 و کامپیوتر شخصی با رم ۴ گیگابایت استفاده شده است. اندازه مثال مدنظر برای مدل فوق شامل ۴ مرکز تولید/باز یافت، ۸ مرکز توزیع/باز توزیع، ۳ مرکز جمع‌آوری، ۳ مد حمل‌ونقل، ۳ نوع محصول، ۳ دوره زمانی، ۲۰ منطقه مشتریان محصولات جدید و ۱۵ منطقه مشتریان برای محصولات باز یافتی است. داده‌های مورد نیاز برای پارامترهای مسئله مطابق جدول ۱ به صورت تصادفی تولید شده‌اند.

با توجه به اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله که در بالا تعریف شد، مدل ریاضی مسئله برنامه‌ریزی تولید و توزیع یکپارچه با هدف افزایش مقدار فعلی سود کل در زنجیره تأمین حلقه بسته به صورت زیر قابل‌تدوین است. در مدل زیر، در عبارت اول تابع هدف ۱، درآمد حاصل از فروش کالاهای جدید، کالاهای باز یافتی و کالاهای غیر قابل‌باز یافت به مشتریان مربوط بیشتر می‌شود. همچنین در تابع هدف، هزینه‌های کل شامل هزینه حمل‌ونقل، هزینه باز یافت و تولید، هزینه تست کیفیت محصولات جمع‌آوری‌شده، هزینه نگهداری موجودی، هزینه خرید محصولات کهنه، هزینه تبلیغات و هزینه کمبود حداقل می‌شود. باید توجه داشت که مقدار ارزش فعلی سود کل با ضرب کردن تابع هدف در فاکتور  $\frac{1}{(1+r)^t}$  به دست می‌آید. می‌توان محصولات جدید را یا به‌کمک مراکز توزیع/باز توزیع، یا به صورت مستقیم از مراکز تولید/باز یافت به مشتریان ارسال کرد. حمل مستقیم به دلیل برآوردن انتظارات مشتریان در مدت زمان مورد انتظار آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. محدودیت ۲ بیان می‌کند همه تقاضای مشتریان برای محصولات جدید برآورده می‌شود. محدودیت‌های ۳ و ۴ نیز به ترتیب روابط تعادلی و سطح ذخیره احتیاطی را در مراکز توزیع/باز توزیع نشان می‌دهند. سطح ذخیره احتیاطی در دوره جاری می‌تواند درصدی از تقاضای مشتری در دوره بعد باشد. در محدودیت ۵، مقدار تولید محصولات جدید در مراکز تولید/باز یافت نشان داده می‌شود. محدودیت‌های ۶ و ۷ محدودیت ارضای تقاضا و تعادل سطح موجودی محصولات باز یافت‌شده در مراکز توزیع/باز توزیع را نشان می‌دهند.

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، ممکن است بخشی از تقاضای محصولات باز یافت‌شده به دلیل فشاری بودن سیستم برآورد آن‌ها با کمبود مواجه شود. محدودیت‌های ۸ و ۹ تضمین می‌کنند که همه کالاهای کهنه از مراکز مشتریان گروه اول و دوم جمع‌آوری می‌شوند. در محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱، میزان محصولات قابل‌باز یافت و غیر قابل‌باز یافت از میان محصولات جمع‌آوری‌شده بر حسب کیفیت آن‌ها تعیین می‌شود. با توجه به محدودیت ۱۲، همه

$$\begin{aligned}
 \text{Max } Z = & \left[ \sum_j \sum_k \sum_n \sum_p \sum_t Pr_{jknp} x_{jknp} + \sum_i \sum_k \sum_n \sum_p \sum_t Pr1_{iknp} x1_{iknp} \right. \\
 & \left. + \sum_j \sum_l \sum_p \sum_n \sum_t Pr2_{jlnpt} x2_{jlnpt} + \sum_p \sum_t Pr3_{pt} y2_{pt} \right] - \\
 & \left[ \sum_i \sum_j \sum_n \sum_p \sum_t Tc_{ijnpt} x3_{ijnpt} + \sum_i \sum_k \sum_n \sum_p \sum_t Tc1_{iknp} x1_{iknp} + \sum_j \sum_k \sum_n \sum_p \sum_t Tc2_{jknp} x_{jknp} + \right. \\
 & \sum_j \sum_k \sum_n \sum_p \sum_t Tc3_{jlnpt} x2_{jlnpt} + \sum_k \sum_m \sum_p \sum_t Tc4_{kmpt} y_{kmpt} + \sum_l \sum_m \sum_p \sum_t Tc5_{lmpt} y1_{lmpt} + \\
 & \sum_m \sum_i \sum_p \sum_t Tc6_{mipt} y3_{mipt} + \sum_i \sum_j \sum_n \sum_p \sum_t Tc_{ijnpt} x4_{ijnpt} + \sum_i \sum_p \sum_t Pc_{ipt} x_{ipt} + \sum_i \sum_p \sum_t Rc_{ipt} (\sum_m y3_{mipt}) + \\
 & \sum_m \sum_p \sum_t Hpc_{mpt} (\sum_k y_{kmpt} + \sum_l y1_{lmpt}) + \sum_j \sum_p \sum_t Hlc1_{jpt} Ic1_{jpt} + \sum_j \sum_p \sum_t Hlc2_{jpt} Ic2_{jpt} + \\
 & \sum_k \sum_p \sum_t \overline{Pur1}_{kpt} (\sum_m y_{kmpt}) + \sum_l \sum_p \sum_t \overline{Pur2}_{lpt} (\sum_m y1_{lmpt}) + \sum_k \sum_p \sum_t Hal_{kpt} (\sum_j \sum_n x_{jknp} + \sum_i \sum_n x1_{iknp}) + \\
 & \left. \sum_l \sum_p \sum_t Ha2_{lpt} (\sum_j \sum_n x2_{jlnpt}) + \sum_l \sum_p \sum_t sc_{lpt} \lambda_{lpt} \right] \tag{1}
 \end{aligned}$$

$$\sum_j \sum_n x_{jknp} + \sum_i \sum_k x1_{iknp} = D1_{kpt} \quad \forall k, p, t \tag{2}$$

$$Ic1_{jp,t-1} + \sum_i \sum_n x3_{ijnpt} - Ic1_{jpt} = \sum_k \sum_n x_{jknp} \quad \forall j, p, t \tag{3}$$

$$Ic1_{jpt} \geq SS1_{jpt} \quad \forall j, p, t \tag{4}$$

$$x_{ipt} = \sum_j \sum_n x3_{ijnpt} + \sum_k \sum_n x1_{iknp} \quad \forall i, p, t \tag{5}$$

$$\sum_j \sum_n x2_{jlnpt} + \lambda_{lpt} - \lambda_{lp,t-1} = D2_{lpt} \quad \forall l, p, t \tag{6}$$

$$Ic2_{jp,t-1} + \sum_i \sum_n x4_{ijnpt} - Ic2_{jpt} = \sum_l \sum_n x2_{jlnpt} \quad \forall j, p, t \tag{7}$$

$$\sum_m y_{kmpt} = Re1_{kpt} \quad \forall k, p, t \tag{8}$$

$$\sum_m y1_{lmpt} = Re2_{lpt} \quad \forall l, p, t \tag{9}$$

$$Rp_{pt} = \beta1_p \sum_k \sum_m y_{kmpt} + \beta2_p \sum_l \sum_m y1_{lmpt} \quad \forall p, t \tag{10}$$

$$y2_{pt} = (1 - \beta1_p) \sum_k \sum_m y_{kmpt} + (1 - \beta2_p) \sum_l \sum_m y1_{lmpt} \quad \forall p, t \tag{11}$$

$$Rp_{pt} = \sum_m \sum_i y3_{mipt} \quad \forall p, t \tag{12}$$

$$\sum_j \sum_n x4_{ijnpt} = \sum_m y3_{mipt} \quad \forall i, p, t \tag{13}$$

$$Td_{ikn} x1_{iknp} - (1 - sl_k) Te_{kp} x1_{iknp} \leq Te_{kp} x1_{iknp} \quad \forall i, k, n, p, t \tag{14}$$

$$Td_{jkn} x_{jknp} - (1 - sl_k) Te_{kp} x_{jknp} \leq Te_{kp} x_{jknp} \quad \forall j, k, n, p, t \tag{15}$$

$$Td2_{jln} x2_{jlnpt} - (1 - sl_l) Te1_{lp} x2_{jlnpt} \leq Te1_{lp} x2_{jlnpt} \quad \forall j, l, n, p, t \tag{16}$$



$$\sum_p b1_p x e_{ipt} + \sum_j \sum_n \sum_p b2_p x4_{ijnpt} \leq ca1_i \quad \forall i, t \tag{17}$$

$$\sum_i \sum_n \sum_p b_p x3_{ijnpe} + \sum_i \sum_n \sum_p b_p x4_{ijnpt} + \sum_p b_p Ic1_{jpt} + \sum_p b_p Ic2_{jpt} \leq ca2_j \quad \forall j, t \tag{18}$$

$$\sum_k \sum_p b3_p y_{knpt} + \sum_l \sum_p b3_p y1_{lmpt} \leq ca3_m \quad \forall m, t \tag{19}$$

$$\sum_i \sum_k \sum_n \sum_p \sum_t x1_{iknpt} \leq UB(\sum_k \sum_p \sum_t D1_{kpt}) \tag{20}$$

$$\sum_k \sum_p Ha1_{kpt} (\sum_j \sum_n x_{jknpt} + \sum_i \sum_n x1_{iknpt}) + \sum_j \sum_l \sum_n \sum_p Ha2_{lpt} x2_{jlnpt} \leq BC_t \quad \forall t \tag{21}$$

$$x_{jknpt}, x1_{iknpt}, x2_{jlnpt}, x3_{ijnpt}, x4_{ijnpt}, \lambda_{lpt}, x e_{ipt}, y_{knpt}, y1_{lmpt}, y2_{pt}, y3_{mipt}, Ic1_{jpt}, Ic2_{jpt} \geq 0 \tag{22}$$

$\forall i, j, k, n, p, l, m, t$

جدول ۱. تولید تصادفی پارامترهای مدل

پارامتر	مقدار تصادفی	پارامتر	مقدار تصادفی
$D1_{kpt}$	~Unif (250, 400)	$Hic1_{jpt}$	~Unif (30, 40)
$D2_{lpt}$	~Unif (130, 200)	$Hic2_{jpt}$	~Unif (15, 25)
$D3_{pt}$	~Unif (50, 200)	$pc_{ipt}$	~Unif (500, 600)
$Re1_{kpt}$	~Unif (60,140)	$Rc_{ipt}$	~Unif (140, 200)
$Re2_{lpt}$	~Unif (80,170)	$Hpc_{mpt}$	~Unif (40, 80)
$SS_{jpt}$	~Unif (60,100)	$Tc_{ijnpt}, Tc2_{jknpt}$	~Unif (15, 25)
$Pr1_{iknpt}, Pr_{jknpt}$	~Unif (1000, 1300)	$Tc4_{knpt}, Tc5_{lmpt}$	~Unif (10, 20)
$Pr2_{jlnpt}$	~Unif (690, 900)	$Tc3_{jlnpt}, Tc6_{mipt}$	~Unif (10, 20)
$Pr_{pt}$	~Unif (450, 600)	$Tc1_{iknpt}$	~Unif (20, 30)
$BC_t$	~Unif (700000, 750000)	$Td_{ikn}$	~Unif (4, 8)
$Pur1_{kpt}$	~Unif (200, 290)	$Td1_{jkn}$	~Unif (6, 10)
$Pur2_{lpt}$	~Unif (130,190)	$Te1_{lp}$	~Unif (15, 20)
$Ha1_{kpt}$	~Unif (20, 30)	$Td2_{jln}$	~Unif (6, 18)
$Ha2_{lpt}$	~Unif (15, 20)	$Te_{kp}$	~Unif (6, 10)
$Sc_{lpt}$	~Unif (60,80)	$\beta1_p, \beta2_p$	~Unif (0.65, 0.85)
$sl_k$	~Unif (0.8, 0.9)	$Ca1_i$	~Unif (10000,15000)
$sl_l$	~Unif (0.7, 0.8)	$Ca2_j$	~Unif (3500,6000)
$b_p, b1_p, b2_p$	~Rand{1, 2}	$Ca3_m$	~Unif (4500,6000)
$\rho_{pr}, \rho_{pr1}, \rho_{pr2}, \rho_{pr3}, \rho_{pur1}, \rho_{pur2}, \rho_{sc}$	~Unif (0.01, 0.06)	$\rho_{D1}, \rho_{D2}, \rho_{D3}, \rho_{Re1}, \rho_{Re2}, \rho_{beta1}, \rho_{beta2}$	~Unif (0.09, 0.12)

سبب ایجاد بیشترین درآمد می‌شود و فروش کالاهای غیرقابل‌باز یافت به مشتریان مواد اولیه کمترین درآمد را ایجاد می‌کند. همچنین فروش کالاهای جدید و باز یافتی به دو گروه مشتریان به‌کمک مراکز توزیع/ بازتوزیع سهم

در جدول ۲ مقادیر، تابع هدف و مقادیر درآمدهای مختلف از فروش محصولات جدید، باز یافتی و محصولات غیرقابل‌باز یافت نشان داده است. براین‌اساس، انتقال مستقیم کالاها از مراکز تولید/ باز یافت به مراکز مشتریان

مرجع در برنامه‌ریزی اصلی سالیانه یا برنامه‌ریزی ظرفیت مواد استفاده می‌شود. در واقع خروجی اصلی برنامه‌ریزی تولید و توزیع، مدل ارائه‌شده جدول ۴ است که می‌تواند به‌عنوان ورودی برنامه‌ریزی سطح عملیاتی استفاده شود؛ برای مثال، در برنامه‌ریزی سطح عملیاتی این نکته بررسی می‌شود که اگر بخواهیم از محصول نوع ۱ در دوره ۱ به میزان ۶۷۲۸ واحد تولید کنیم (که براساس جدول ۴ مقدار بهینه تولید است)، برنامه تولید روزانه این محصول و برنامه تهیه مواد اولیه آن باید به چه ترتیب انجام شود.

### تحلیل حساسیت

در این بخش، تحلیل حساسیت درباره پارامتر تقاضا و میزان بازگشتی (میزان محصولات کهنه خریداری‌شده) صورت می‌گیرد. با توجه به شکل ۲، مقدار تابع هدف با بیشتر شدن تقاضای محصولات جدید افزایش می‌یابد. در شکل ۲، تأثیر مستقیم مقدار تقاضا بر عملکرد تابع هدف آمده است.

تقریباً یکسانی در تابع هدف دارند. در جدول ۳ هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های تولید، هزینه‌های تبلیغات و هزینه‌های کمبود در تابع هدف آمده است. براین اساس، هزینه تولید محصولات جدید بیشترین سهم هزینه‌ها را در تابع هدف دارد. همچنین سهم هزینه‌های حمل‌ونقل و بازیافت کالاها در تابع هدف فراوان است. با توجه به نتایج جدول ۳، بخشی از موجودی کالای جدید در مراکز توزیع/بازتوزیع نگهداری می‌شود. همچنین بین مقدار موجودی کالاهای بازیافتی و تقاضای مشتریان برای کالاهای بازیافتی تعادل به‌وجود می‌آید؛ به‌طوری‌که در جواب بهینه تعداد کمی از تقاضای مشتریان کالاهای بازیافتی با کمبود مواجه می‌شود.

مقدار محصولات جدید، بازیافتی و محصولات غیرقابل بازیافت، موجودی محصولات جدید و بازیافتی در هر دوره در جدول ۴ آمده است که نتایج آن به‌عنوان

جدول ۲. مقدار تابع هدف و درآمدهای مختلف از فروش کالاها

فروش کالای غیرقابل بازیافتی	فروش کالای بازیافتی	فروش کالای جدید از مراکز توزیع	فروش کالای جدید از مراکز تولید	مقدار تابع هدف
۴۶۲۴۷۲۸	۱۹۶۷۰۲۰۰	۱۹۰۶۶۳۷۰	۴۴۶۲۹۲۲۰	۴۳۴۷۰۱۱۰

جدول ۳. مقدار هزینه‌های مختلف در تابع هدف (هزار)

هزینه کمبود	هزینه تبلیغات	هزینه خرید کالاها	هزینه نگهداری کالای بازیافتی	هزینه نگهداری کالای جدید	هزینه تست کیفیت	هزینه بازیافت	هزینه تولید	هزینه حمل‌ونقل
۲۰	۱۶۵۹	۶۷۹۵	۷۷	۱۸۸	۱۵۶۲	۳۱۷۸	۲۷۸۹۹	۳۱۳۷

جدول ۴. مقادیر بهینه تولید کالای جدید، بازیافتی، غیرقابل بازیافت، موجودی کالای جدید و بازیافتی

نوع محصول	دوره	مقدار تولید محصول جدید	مقدار محصول بازیافتی	مقدار محصول غیرقابل بازیافتی	موجودی محصول جدید	موجودی محصول بازیافتی
۱	۱	۶۷۲۸	۳۱۳۱	۹۰۰	۶۱۱	۳۵۱
	۲	۵۸۳۹	۳۰۱۶	۸۶۳	۶۱۳	۱۱۸۱
	۳	۵۵۵۳	۲۸۴۵	۸۲۳	۶۰۶	۱۶۴۳
۲	۱	۶۹۷۷	۲۹۷۱	۱۰۷۱	۶۵۱	۰
	۲	۶۰۳۱	۲۹۰۱	۱۰۴۷	۶۴۴	۴۵۴
	۳	۵۷۹۱	۲۸۳۳	۱۰۲۲	۶۸۵	۸۶۰
۳	۱	۷۰۸۳	۲۵۷۹	۱۲۰۵	۶۵۴	۰
	۲	۶۱۰۶	۲۶۴۱	۱۲۳۱	۶۲۷	۳۴

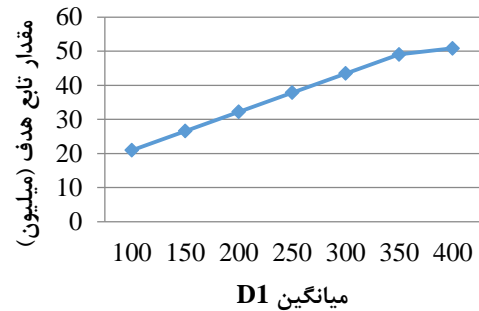
می‌یابد. این امر شاید به دلیل هزینه‌های بالای بازیافت و جمع‌آوری در مقایسه با قیمت فروش پایین آن‌ها رخ دهد.

### نتیجه‌گیری

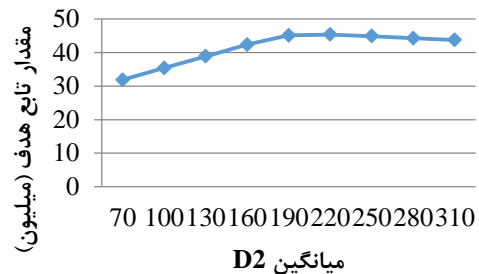
در این پژوهش، مدل بهینه‌سازی برای مسئله برنامه‌ریزی تولید و توزیع یکپارچه در زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه شد. در مدل پیشنهادی، چندین مدل حمل‌ونقل، حمل مستقیم از مرکز تولید/ بازیافت، چندین گروه مشتریان برای محصولات جدید و بازیافتی در نظر گرفته می‌شود.

برای ارزیابی مدل پیشنهادی، مثالی عددی با توجه به ادبیات موضوع ساخته شد. در نهایت برای بررسی حساسیت مدل، تحلیل حساسیت پارامترهای تقاضا و میزان بازگشتی‌ها صورت گرفت. با توجه به نتایج می‌توان از مدل فوق برای بهینه‌سازی سطح تصمیم‌گیری تاکتیکی در صنایع الکترونیک و صنایعی که محصولات آن‌ها با هزینه پایین قابل بازیافت و ارائه در بازارهای ثانویه است استفاده کرد. همچنین مزیت دیگر مدل پیشنهادی این است که تصمیم‌های خروجی آن با توجه به فرضیه‌های دقیق برنامه‌ریزی میان مدت تعیین می‌شود؛ بنابراین می‌توان آن را به عنوان ورودی در تصمیم‌گیری دوره کوتاه مدت به کار برد.

به عنوان پژوهش‌های آتی می‌توان مدل پیشنهادی را با فرض غیرقطعی بودن پارامترها و استفاده از رویکردهایی مانند بهینه‌سازی تصادفی، فازی یا استوار با توجه به نوع عدم قطعیت توسعه داد. همچنین بررسی اهداف محیط‌زیستی برای مدل فوق و ارائه مدل چندهدفه بهینه‌سازی می‌تواند از زمینه‌های مفید برای پژوهش آتی باشد.



شکل ۲. تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات تقاضای محصولات جدید



شکل ۳. تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات تقاضای محصولات بازیافتی

شکل ۳ میزان حساسیت تابع هدف را نسبت به تغییرات میزان کالاهای بازگشتی قابل بازیافت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان بازگشتی‌های قابل بازیافت که در واقع تقاضای گروه مشتریان محصولات بازیافتی را تأمین می‌کند، مقدار تابع هدف نیز بیشتر می‌شود. با افزایش بیش از حد میزان بازگشتی‌های قابل بازیافت مقدار سود کل به تدریج کاهش

### منابع

1. Kenne, J. P., Dejax, P., and Gharbi, A. (2012). "Production Planning of a Hybrid Manufacturing Remanufacturing System Under Uncertainty Within a Closed-Loop Supply Chain", *International Journal of Production Economics*, Vol. 135, No. 1, PP. 81–93.
2. Vahdani, B., Razmi, J., and Tavakkoli Moghaddam, R. (2012). "Fuzzy Possibilistic Modeling for Closed Loop Recycling Collection Networks", *Environmental Modeling and Assessment*, Vol. 17, No. 6, PP. 623-637.
3. Souza, G.C. (2013). "Closed-Loop Supply Chains: A Critical Review and Future Research", *Decision Sciences*, Vol. 44, No. 1, PP. 7–38.
4. Pishvae, M.S., Zanjirani Farahani, R., and Dullaert, W. (2010). "A Memetic Algorithm for Bi-Objective Integrated Forward/ Reverse Logistics Network Design", *Computers and Operations Research*, Vol. 37, No. 6, PP. 1100–1112.

5. Pishvae, M. S., Jolai, F., and Razmi, J. (2009). "A Stochastic Optimization Model for Integrated Forward/ Reverse Supply Chain Network Design", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 28, No. 4, PP. 107–114.
  6. Easwaran, G., and Üster, H. (2010). "A Closed-Loop Supply Chain Network Design Problem with Integrated Forward and Reverse Channel Decisions", *IIE Transactions*, Vol. 42, No. 11, PP. 779-792.
  7. Pishvae, M. S., Rabbani, M., and Torabi, S.A. (2011). "A Robust Optimization Approach to Closed-Loop Supply Chain Network Design Under Uncertainty", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 35, No. 2, PP. 637–649.
  8. Fallah Tafti, A. et al. (2014). "An Interactive Possibilistic Programming Approach for a Multi-Objective Closed-Loop Supply Chain Network Under Uncertainty", *International Journal of Systems Science*, Vol. 45, No. 3, PP. 283-299.
  9. Özceylan, E. (2014). "Interactive Fuzzy Programming Approaches to the Strategic and Tactical Planning of a Closed-Loop Supply Chain Under Uncertainty", *International Journal of Production Research*, Vol. 52, No. 8, PP. 2363-2387.
  10. Vahdani, B. et al. (2013). "Reliable Design of a Closed Loop Supply Chain Network Under Uncertainty: An Interval Fuzzy Possibilistic Chance-Constrained Model", *Engineering Optimization*, Vol. 45, No. 6, PP. 745-765.
  11. Ramezani, M., Bashiri, M., and Tavakkoli Moghaddam, R. (2013). "A New Multi-Objective Stochastic Model for a Forward/Reverse Logistic Network Design with Responsiveness and Quality Level", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 1, PP. 328–344.
  12. 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, No. 19, PP. 5475–5499.
  13. Leung, S. C. H. et al. (2007). "A Robust Optimization Model for Multi-Site Production Planning Problem in an Uncertain Environment", *European Journal of Operational Research*, Vol. 181, No. 1, PP. 224–238.
  14. Ghasemy Yaghin, R., Torabi, S. A., and Fatemi Ghomi, S. M. T. (2012). "Integrated Markdown Pricing and Aggregate Production Planning in a Two Echelon Supply Chain: A Hybrid Fuzzy Multiple Objective Approach", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, No. 12, PP. 6011–6030.
  15. Jamalnia, A., and Soukhakian, M. A. (2009). "A Hybrid Fuzzy Goal Programming Approach with Different Goal Priorities to Aggregate Production Planning", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 56, No. 4, 1474–1486.
  16. Liu, S., and Papageorgiou, L. G. (2013). "Multi Objective Optimisation of Production, Distribution and Capacity Planning of Global Supply Chains in the Process Industry", *Omega*, Vol. 41, No. 2, PP. 369–382.
  17. Sampaio, R. J. B., Wollmann, R. R. G., and Vieira, P. F. G. (2017). "A Flexible Production Planning for Rolling-Horizons", *International Journal of Production Economics*, Vol. 190, No. 1, PP. 31-36.
  18. Haijun, W. et al. (2017). "An Optimization Algorithm for Integrated Remanufacturing Production Planning and Scheduling System", *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 105, No. 1, PP. 69-76.
  19. Kim, T., and Glock, C. H. (2018). "Production Planning for a Two-Stage Production System with Multiple Parallel Machines and Variable Production Rates", *International Journal of Production Economics*, Vol. 196, No. 1, PP. 284–292.
  20. Govindan, K., Soleimani H., and Kannan D. (2015). "Reverse Logistics and Closed-Loop Supply Chain: A Comprehensive Review to Explore the Future", *European Journal of Operational Research*, Vol. 240, No. 3, PP. 603-626.
-

### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Closed-Loop Supply Chain
  2. Production-Distribution Planning
  3. Production Planning
  4. Forward-Reverse Logistics
  5. Optimization
  6. Tactical Level Programming
  7. Mathematical Programming
  8. Linear Programming
  9. Sensitivity Analysis
-