

# طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند محصولی احتمالی با در نظر گرفتن تخفیف و حل به کمک الگوریتم کرم شب تاب با رمزگشایی بر پایه اولویت

میثم جعفری اسکندری<sup>۱\*</sup>، ندا مقدم شیلو<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشگاه پیام نور، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه پیام نور، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

رسید مقاله: ۵ دی ۱۳۹۵

پذیرش مقاله: ۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۷

## چکیده

زنجیره تأمین حلقه بسته به دلیل عامل‌های زیست‌محیطی و کسب و کار در حال تبدیل شدن به یکی از مهم‌ترین حوزه‌های صنعت است. برنامه‌ریزی و پیاده‌سازی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته مناسب، سود بیش‌تر، رضایت مشتری و یک تصویر اجتماعی خوب برای شرکت به ارمغان می‌آورد. درحالی‌که بیش‌تر شبکه‌های زنجیره تأمین، مجهز به کانال‌های برگشت کالا نیستند، این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای کمینه‌سازی، هزینه‌های حمل و نقل، هزینه‌های عملیاتی، هزینه خرید کالا و هزینه‌های ثابت احداث در یک شبکه زنجیره تأمین احتمالی چند محصولی را ارائه می‌کند. مدل پیشنهادی، یک مدل زنجیره تأمین چند محصولی احتمالی با امکان تخفیف خرید کالا از تأمین‌کننده می‌باشد. از آنجایی‌که مسایل طراحی شبکه در دسته مسایل NP-سخت قرار می‌گیرند، در این مقاله از الگوریتم کرم شب تاب با رمزگشایی بر پایه اولویت برای یافتن جواب بهینه نزدیک استفاده شده است. برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم پیشنهادی با پنج الگوریتم (الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم جنگل، الگوریتم مورچگان، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم زنبور عسل) در هفت معیار مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نتایج عددی مرتبط از طریق راه حل دقیق و همچنین پنج الگوریتم پیشنهادی در مجموعه‌ای از مسایل نمونه، از ارائه عملکرد با کیفیت بالای الگوریتم کرم شب تاب با رمزگشایی بر پایه اولویت نشان دارد.

**کلمات کلیدی:** طراحی شبکه زنجیره تأمین، تخفیف خرید کالا، الگوریتم کرم شب تاب، رمزگشایی بر پایه اولویت.

## ۱ مقدمه

زنجیره تأمین، نگرشی است که در سال‌های اخیر مورد توجه سازمان‌ها و شرکت‌ها قرار گرفته است. در این نگرش کلیه اجزا و حلقه‌هایی که برای ارائه محصول و یا خدمت به مشتری در کنار هم قرار دارند، مورد توجه قرار گرفته

\* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: Meisam\_Jafari@pnu.ac.ir

و سعی می‌شود تصمیمات راهبردی به گونه‌ای اتخاذ گردد که کل زنجیره تأمین در مقابل زنجیره‌های رقیب از کارایی و اثربخشی بیش‌تری برخوردار باشد. یک زنجیره تأمین محدود به اجزا و مکان‌های تولید نبوده؛ بلکه کلیه اجزای تولیدی و خدماتی را از تأمین‌کننده اولیه تا مشتری نهایی در برمی‌گیرد. عدم هماهنگی و یکپارچگی بین بخش‌های مختلف زنجیره تأمین منجر به افزایش هزینه تمام‌شده کالا و به تبع آن افزایش قیمت، عدم تحویل به موقع محصولات و ... می‌گردد که این امر در نهایت افزایش نارضایتی مصرف‌کنندگان را در پی دارد. اصطلاح مدیریت زنجیره تأمین در اواخر دهه هشتاد میلادی مطرح شد و در دهه نود میلادی به صورت گسترده‌تری مورد استفاده قرار گرفت. بیش از این از عباراتی همچون زنجیره تأمین و مدیریت عملیات به جای مدیریت زنجیره تأمین استفاده می‌شد.

مدیریت زنجیره تأمین در لغت‌نامه (APICS) به عنوان طراحی، برنامه‌ریزی، اجرا، کنترل و نظارت بر فعالیت‌های زنجیره تأمین، باهدف ساخت ارزش خالص، ایجاد یک زیرساخت جامع، اعمال نفوذ تدارکات در سراسر جهان، هماهنگی عرضه و تقاضا و اندازه‌گیری عملکرد آن در سطح جهانی تعریف شده است. یک زنجیره تأمین نوعی جریان مواد و اطلاعات بین سطوح مختلف یک شبکه تولیدی یا خدماتی است که این شبکه شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده، عمده‌فروش، خرده‌فروش و مشتری نهایی می‌باشد. در سال‌های اخیر، سازمان‌ها و شرکت‌ها بنا به ماهیت محصولات، الزامات قانونی و زیست‌محیطی و همچنین کسب ارزش مجدد، مسئولیت محصولات دورریز را بر عهده می‌گیرند. با در نظر گرفتن موارد اشاره‌شده، شبکه زنجیره تأمین گسترده‌تر و شامل مراکز جمع‌آوری محصولات، بازرسی، تعمیر، بازیافت و انهدام شده است.

طراحی شبکه زنجیره تأمین یکی از مهم‌ترین تصمیمات راهبردی در مدیریت زنجیره تأمین تلقی می‌گردد و شامل تصمیم‌گیری بر روی تعداد و مکان تسهیلات، ظرفیت و مقدار جریان بین آن‌ها، تأثیرات هم‌زمان هزینه و سطوح سرویس مشتری می‌باشد. بدون شک مساله تصمیم‌گیری در خصوص مکان‌یابی تسهیلات جزء تصمیمات راهبردی بوده و تغییرات آن در کوتاه‌مدت امکان‌پذیر نیست. این امر بدین خاطر می‌باشد که تصمیمات عملیاتی بعد از تصمیمات راهبردی اتفاق می‌افتد و پیکربندی شبکه‌های زنجیره تأمین باید برای سطوح عملیاتی تشکیل شود. در گذشته طراحی شبکه زنجیره تأمین بر اساس توابع اقتصادی در نظر گرفته می‌شد؛ اما امروزه با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، بحث محیط زیست مورد توجه جدی قرار گرفته و به عنوان یکی از عوامل تعیین‌کننده در مدیریت زنجیره تأمین مورد نظر محققان قرار گرفته است. امروزه سرمایه‌گذاری در ساختار زنجیره تأمین با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی، یک موضوع به‌روز و بسیار مهم برای محققان شده و این امر به خاطر خروج عمده‌ای از مخرب‌های زیست‌محیطی از محیط می‌باشد که پیامدهایی از جمله افزایش گرمای کره زمین را در پی دارد. با وجود این طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن عوامل زیست‌محیطی، صرفاً به خاطر حفاظت از محیط‌زیست و افزایش هزینه سرمایه‌گذاری در این خصوص نبوده؛ بلکه یک کسب‌وکار خوب با سود بیش‌تر محسوب می‌شود [۱].

در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت روزافزون مسایل طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته و معکوس، مقالات متعددی در این زمینه منتشر شده است. ارواندان و پرنسلوام یک مقاله مروری در سال ۲۰۱۴ برای طراحی

شبکه‌های لجستیک معکوس و حلقه بسته ارایه دادند. آن‌ها ۳۸۲ مقاله منتشر شده بین سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۳ را بر اساس سال و مجله منتشر شده، روش حل، توابع هدف و غیره دسته‌بندی و بیان کردند، حدود ۴۹/۷٪ از کل مسایل زنجیره تأمین انجام شده مربوط به طراحی شبکه‌های لجستیک حلقه بسته و ۳۹/۷٪ از آن‌ها مربوط به طراحی شبکه‌های لجستیک معکوس می‌باشد و تنها ۱۰/۶٪ از مقالات در زمینه‌ی شبکه‌های زنجیره تأمین سبز و پایدار منتشر شده‌اند. همچنین در این تحقیق تنها ۱۲/۴٪ از مقالات منتشر شده، مدل‌هایی با اهداف چندگانه و ۸۷/۶٪ از آن‌ها، مدل‌های تک هدف را شامل می‌شود [۲].

یکی از عمده‌ترین تحقیقاتی که در زنجیره تأمین معکوس و حلقه بسته بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است، پیکربندی شبکه زنجیره تأمین می‌باشد. این زمینه شامل هماهنگی و یکپارچه‌سازی فعالیت‌های کلیدی تجاری از فعالیت‌های خرید مواد اولیه تا توزیع محصولات نهایی به مشتریان است که فرآیند برنامه‌ریزی زنجیره تأمین را ایجاب می‌کند [۳]. در فرآیندهای تصمیم‌گیری عامل اصلی که ممکن است اثربخشی پیکربندی و هماهنگی را در طول زنجیره تأمین تحت تأثیر قرار دهد، عدم قطعیت است. اکثر نویسندگان از مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات برای فرمول‌بندی شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته استفاده کرده‌اند. همچنین نویسندگان متعددی برای فرمول‌بندی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز از مدل‌های چندهدفه که می‌توان به حداقل کردن هزینه یا حداکثر کردن سود، پاسخگویی به مشتریان و با توجه به اهمیت مسایل زیست‌محیطی، به بعضی از اهداف که به محیط زیست ربط دارند، اشاره کرد که این اهداف متعارض، پیچیدگی حل مدل‌های طراحی شبکه را افزایش می‌دهند. در این بخش به مرور ادبیات مربوط به مدل‌های ارایه شده در پیکربندی شبکه زنجیره تأمین در مدل‌های قطعی و غیرقطعی توسط نویسندگان مختلف اشاره شده است.

فلش‌من و همکاران در سال ۲۰۰۱ یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارایه نمودند. آن‌ها برای بررسی کارایی مدل خود از دو مثال بازسازی دستگاه‌های کپی و بازیافت کاغذ استفاده کردند [۴]. اسپچالمن و همکاران در سال ۲۰۰۳ یک مدل لجستیک معکوس برای جمع‌آوری و بازیافت باتری در آلمان طراحی کردند. آن‌ها از یک رویه ترکیبی برای استقرار زنجیره تأمین حلقه بسته استفاده کردند که حاصل یک مدل بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی شبکه لجستیک معکوس و مدل فرآیند جریان برای بازیافت باتری بود [۵]. ایندرفورس در سال ۲۰۰۵ یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته را که بر اساس برنامه‌ریزی احتمالی در نظر گرفته شده بود مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و نرخ برگشتی محصولات، پارامتری را برای اندازه‌گیری عدم قطعیت در کیفیت تعریف نمودند [۶]. کوینارد و همکاران در سال ۲۰۰۸ یک مدل ریاضی احتمالی را برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با حل به کمک الگوریتم ژنتیک ارایه نمودند [۷]. لی و چن در سال ۲۰۰۹ یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای تعیین مکان تسهیلات برای بیشینه کردن رضایت مشتریان ارایه کردند. آن‌ها از سیستم ID برای شمارش اقلام جمع‌آوری شده در مراکز جمع‌آوری و ارسال آن به مرکز بازسازی شده بهره جستند [۸].

ساسیکومار و همکاران در سال ۲۰۱۰ یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای بیشینه‌سازی سود یک شبکه لجستیک معکوس چند سطحی ارایه نمودند. آن‌ها یک مطالعه موردی از بازیافت تایر برای بازار

دست دوم در این مدل استفاده کردند [۹]. پیشوایی و ترابی در سال ۲۰۱۰ یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح آمیخته دو هدفه را گسترش دادند که اهداف آن کمینه کردن هزینه کل شبکه و بیشینه کردن پاسخگویی را در شبکه لجستیک شامل می شد. آن ها از الگوریتم تقلیدی برای حل مساله استفاده نمودند [۱۰]. خواجوی و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک مدل دو هدفه برای طراحی شبکه لجستیک یکپارچه روبه جلو و معکوس چند مرحله ای با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت ارایه کردند که در آن دو هدف حداقل کردن کل هزینه ها و حداکثر سازی پاسخگویی شبکه به طور هم زمان در نظر گرفته شده است [۱۱]. داس و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک مدل برنامه ریزی ریاضی عدد صحیح آمیخته برای شبکه لجستیک معکوس در سطح تصمیم گیری راهبردی ارایه نمودند. آن ها در مدل پیشنهادی خود خرده فروش ها را به عنوان یک کانال دوطرفه برای ساخت محصولات جدید، جمع آوری محصولات مصرف شده و بازاریابی دوباره محصولات بازیافت شده معرفی کردند [۱۲]. محمود زاده و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک شبکه لجستیک سه سطحی برای عمر محصولات وسایل نقلیه گسترش دادند. آن ها یک مدل برنامه ریزی ریاضی عدد صحیح آمیخته برای تعیین مکان های اسقاطی در ایران و مقدار بهینه تخصیص مواد بین مراکز ارایه نمودند [۱۳]. دونمز و تورکای نیز در سال ۲۰۱۳ یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس ارایه دادند. این مدل جمع آوری، دسته بندی، بازیافت و انهدام مواد زاید باتری در محل دفن زباله را در برمی گرفت و هدف مدل کمینه سازی هزینه های بازیافت مواد بود [۱۴]. اوزجیلان و همکاران، در سال ۲۰۱۴ یک مدل یکپارچه برای بهینه سازی تصمیمات راهبردی مربوط به مقدار جریان کالا در زنجیره های روبه جلو و معکوس و بهینه سازی تصمیمات راهبردی در بالانس خط تولید در زنجیره تأمین معکوس ارایه دادند. آن ها مدل غیرخطی عدد صحیح آمیخته را باهدف کاهش هزینه های حمل و نقل، خرید، بازسازی و عملیات دمونتاژ گسترش دادند [۱۵]. جارج و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک مدل دو هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس با اهداف کمینه سازی هزینه های شبکه و بیشینه سازی عملکرد خدمات برون سپاری گسترش دادند که به بهینه سازی جریان مابین تسهیلات نیز می پردازد [۱۶]. سردار و آشحاب در سال ۲۰۱۶ به ارایه یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته چند دوره ای و چند محصولی پرداختند [۱۷]. کشاورز و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته چند دوره ای، چند محصولی و چند هدفه را در شرایط عدم قطعیت مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. فرخی و همکاران در سال ۱۳۹۵ به توسعه یک رویکرد برنامه ریزی فازی استوار برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پرداختند. آن ها در این پژوهش توسعه یک رویکرد برنامه ریزی تصادفی فازی استوار با استفاده از مفاهیم برنامه ریزی با محدودیت های اعتبار و میانگین انحراف مطلق برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت ترکیبی را مورد نظر قرار دادند [۱۹]. در تحقیق دیگری در سال ۱۳۹۶، قهرمانی نهر و همکارانش به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز چند هدفه چند محصولی و چند دوره ای با در نظر گرفتن تخفیف در شرایط عدم قطعیت پرداختند. آن ها در این مقاله یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته دو هدفه، چند دوره ای، چند محصولی با در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی و اعمال مفاهیم کمبود قابل جبران و تخفیف، گسترش داده اند [۲۰]. با توجه به تحقیقات متعددی

که در این حوزه صورت گرفته است، در ادامه به دسته‌بندی تحقیقات حاضر در این زمینه از نظر تابع هدف، نوع زنجیره، روش حل و نوع تقاضا پرداخته و نوآوری تحقیق حاضر را مورد نظر قرار خواهیم داد.

جدول ۱. خلاصه پیشینه تحقیق

| ردیف       | سال  | محققین                | تابع هدف |        | نوع زنجیره |           | روش حل   |          | تقاضا    |          |
|------------|------|-----------------------|----------|--------|------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
|            |      |                       | حداقل    | حداکثر | تک مرحله   | چند مرحله | دو مرحله | تک مرحله | تک مرحله | تک مرحله |
| ۱          | ۲۰۱۰ | ساسیکومار و همکاران   | *        | *      | *          | *         | *        | *        | *        | *        |
| ۲          | ۲۰۱۰ | پیشوایی و همکاران     | *        | *      | *          | *         | *        | *        | *        | *        |
| ۳          | ۲۰۱۲ | داس و همکاران         | *        | *      | *          | *         | *        | *        | *        | *        |
| ۴          | ۲۰۱۳ | محمودزاده و همکاران   | *        | *      | *          | *         | *        | *        | *        | *        |
| ۵          | ۲۰۱۴ | اوزجیلان و همکاران    | *        | *      | *          | *         | *        | *        | *        | *        |
| ۶          | ۲۰۱۵ | جارج و همکاران        | *        | *      | *          | *         | *        | *        | *        | *        |
| ۷          | ۲۰۱۶ | سردار و آشحاب         | *        | *      | *          | *         | *        | *        | *        | *        |
| ۸          | ۲۰۱۷ | کشاورز و همکاران      | *        | *      | *          | *         | *        | *        | *        | *        |
| ۹          | ۱۳۹۵ | فرخ و همکاران         | *        | *      | *          | *         | *        | *        | *        | *        |
| ۱۰         | ۱۳۹۶ | قهرمانی نهر و همکاران | *        | *      | *          | *         | *        | *        | *        | *        |
| پژوهش حاضر |      |                       | *        | *      | *          | *         | *        | *        | *        | *        |

همان‌طور که در بررسی تحقیقات پیشینه ملاحظه می‌گردد، این تحقیق از جنبه‌های زیر دارای نوآوری می‌باشد:

(۱) مدل مساله غیرخطی عدد صحیح آمیخته می‌باشد که تحقیقات محدودی در این حوزه صورت گرفته است.

(۲) طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته هفت سطحی

(۳) در این مدل مبحث تخفیف کالا به‌عنوان یکی از مولفه‌ها در شرایط واقعی با توجه به چند محصولی که از یک تامین کننده دریافت می‌شود، مدل‌سازی گردیده است.

(۴) تقاضا در این مدل به‌صورت احتمالی در نظر گرفته شده است که تاکنون در هیچ تحقیقی این بحث مورد نظر قرار گرفته نشده است.

(۵) شاید مهم‌ترین چالش در بهینه‌یابی خصوصاً بهینه‌یابی توسط الگوریتم‌های فراابتکاری، انتخاب الگوریتم مناسب باشد. انتخاب هر الگوریتم به نوع مساله، الگوریتم‌های در دسترس، ابزارهای محاسباتی و قیدهای مساله وابسته است. در مقاله‌ای که توسط شهروزی و صالحی در سال ۱۳۹۶ انجام گرفت، آن‌ها با بررسی هفت الگوریتم بهینه‌یابی به بررسی نحوه عملکرد آن‌ها در حل چهار مساله آزمون پرداختند و به کمک شاخص‌های عملکردی مقایسه‌ای از کیفیت آن‌ها ارایه دادند. نتایج تحلیل نشان داد که الگوریتم‌هایی که شاخص پراکندگی جمعیت در آن‌ها با تکرار برنامه کاهش پیدا کرده؛ اما به صفر نمی‌رسد، پاسخ‌های مناسب‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌ها از خود نشان می‌دهند [۲۱]. در این مقاله نیز الگوریتم مورد استفاده برای حل این مدل، الگوریتم کرم شب‌تاب با رمزگشایی بر پایه اولویت می‌باشد که علاوه بر

اینکه برای اولین بار از این الگوریتم در حل مسایل زنجیره تأمین استفاده شده است، پراکندگی جمعیت در آن با تکرار برنامه کاهش پیدا کرده اما به صفر نمی‌رسد. ما همچنین برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم پیشنهادی را با پنج الگوریتم (الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم جنگل، الگوریتم مورچگان، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم زنبور عسل) در هفت معیار مورد مقایسه قرار داده‌ایم. در بخش بعد به مدل‌سازی شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی پرداخته شده است. به دلیل NP-سخت بودن مساله با افزایش متغیر و ابعاد، مساله پیچیده می‌باشد و حل آن با روش‌های مرسوم دشوار است. برای رفع این مشکل از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده می‌گردد. در بخش سوم الگوریتم کرم شب‌تاب و رمزگشایی بر پایه اولویت تشریح شده است. بخش چهارم به نتایج محاسباتی می‌پردازد و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی بیان خواهد شد.

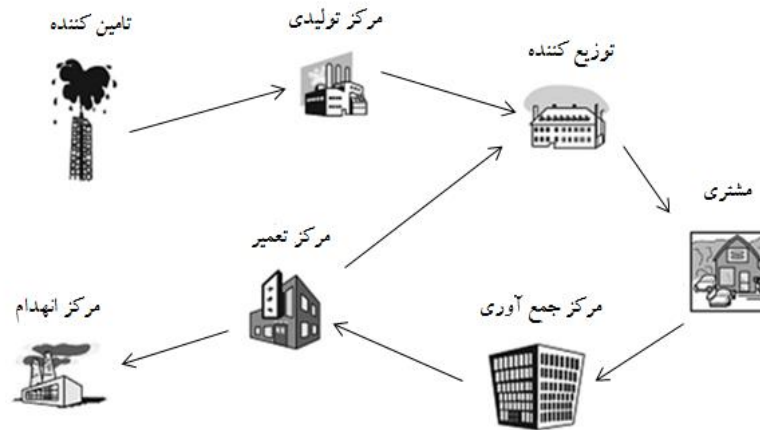
## ۲ شرح مساله و مدل پیشنهادی

در این مقاله یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته هفت سطحی در نظر گرفته شده است. شبکه روبه‌جلو شامل سطوح تأمین‌کننده محصولات نیمه ساخته، مراکز تولیدی، مراکز توزیع‌کننده محصولات و مشتریان نهایی هستند. شبکه معکوس نیز شامل مراکز جمع‌آوری محصولات مصرف‌شده، مراکز تعمیر و مراکز انهدام می‌باشد. مطابق شکل ۱ در مسیر جریان روبه‌جلو، تأمین‌کننده، محصول نیمه ساخته مورد نیاز را به مراکز تولیدی ارسال می‌کند. محصولات پس از تولید در مراکز تولیدی برای فروش به مراکز توزیع ارسال می‌شود. مراکز توزیع‌کننده محصولات، پس از دریافت محصولات از مراکز تولیدی، آن‌ها را به مشتریان نهایی ارسال می‌کنند. در مسیر بازگشت نیز، مقداری از محصولات مصرف‌شده توسط مشتری، توسط مرکز جمع‌آوری، جمع‌آوری می‌شود و به مرکز تعمیر ارسال می‌گردد. در مرکز تعمیر پس از بازرسی محصولات، آن دسته از محصولات که قابل تعمیر باشد، پس از تعمیر به مراکز توزیع ارسال می‌شود و مابقی محصولات به عنوان محصول قراضه روانه مرکز انهدام می‌گردد. ما همچنین در این مقاله براساس تحقیقی که توسط لیاو و ریچر در سال ۲۰۰۷ میلادی با در نظر گرفتن سیاست تخفیف و استفاده از توزیع نرمال برای تقاضا در نظر گرفته‌اند [۲۲]، در این مقاله تقاضای مشتری از هر محصول و همچنین مقدار محصولات مصرف‌شده توسط مشتریان را به صورت احتمالی در نظر گرفته و از توزیع نرمال برای تعریف آن‌ها به عنوان پارامتر در مدل استفاده نموده‌ایم.

فرض‌های مساله شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند محصولی شامل موارد ذیل می‌باشد:

- مدل پیشنهادی شامل چندین محصول متفاوت مرتبط با یک تأمین‌کننده می‌باشد.
- تقاضای مشتری از هر محصول امکان‌پذیر بوده و کمبود مجاز نیست.
- تأمین‌کننده، محصولات نیمه ساخته مورد نیاز برای تولید محصولات را با یک تخفیف مقداری به فروش می‌رساند.
- ظرفیت تمامی تسهیلات بالقوه محدود و مشخص می‌باشد.

- پارامترهای تقاضا، میزان نرخ برگشت محصولات، هزینه‌های حمل و نقل و عملیاتی، غیرقطعی و احتمالی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. مدل پیشنهادی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته

با در نظر گرفتن فرض‌های فوق، مهم‌ترین موضوع اشاره شده در این پژوهش، انتخاب و مکان‌یابی مراکز تأمین کننده، مراکز تولیدی، مراکز توزیع کننده محصولات، مراکز تعمیر و مراکز انهدام و همچنین تعیین مقدار بهینه جریان بین مراکز و سطح مناسب تخفیف می‌باشد.

#### • مجموعه، پارامتر و متغیرهای تصمیم

برای مدل‌سازی مساله، مجموعه پارامتر و متغیرهای تصمیم به صورت زیر تعریف می‌شوند:

#### • مجموعه‌ها

- $I$  مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز تأمین کننده
- $J$  مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز تولیدی
- $K$  مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز توزیع کننده محصولات
- $C$  مجموعه نقاط ثابت مشتری
- $L$  مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز جمع آوری محصولات
- $M$  مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز انهدام
- $N$  مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز تعمیر
- $P$  مجموعه محصول
- $T$  مجموعه وسایل نقلیه
- $H$  مجموعه سطوح تخفیف

#### • پارامترها

$$Dem_{cp} \sim N(\mu_{Dem}, Var_{Dem}) \quad \text{تقاضای مشتری } c \text{ از محصول } p$$

$$R_{cp} \sim N(\mu_R, Var_R) \quad \text{مقدار محصولات مصرف شده } p \text{ از مشتری } c$$

|                |                                                                            |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $\varphi_{np}$ | ظرفیت تعمیر محصول $p$ در مرکز تعمیر $n$                                    |
| $F_i$          | هزینه ثابت احداث تأمین کننده $i$                                           |
| $F_j$          | هزینه ثابت احداث مرکز تولیدی $j$                                           |
| $F_k$          | هزینه ثابت احداث مرکز توزیع $k$                                            |
| $F_l$          | هزینه ثابت احداث مرکز جمع آوری $l$                                         |
| $F_n$          | هزینه ثابت احداث مرکز تعمیر $n$                                            |
| $F_m$          | هزینه ثابت احداث مرکز انهدام $m$                                           |
| $TC_{ijpt}$    | هزینه حمل و نقل یک واحد محصول $p$ توسط وسیله نقلیه $t$ بین مراکز $i$ و $j$ |
| $TC_{jkpt}$    | هزینه حمل و نقل یک واحد محصول $p$ توسط وسیله نقلیه $t$ بین مراکز $j$ و $k$ |
| $TC_{kcpt}$    | هزینه حمل و نقل یک واحد محصول $p$ توسط وسیله نقلیه $t$ بین مراکز $k$ و $c$ |
| $TC_{clpt}$    | هزینه حمل و نقل یک واحد محصول $p$ توسط وسیله نقلیه $t$ بین مراکز $c$ و $l$ |
| $TC_{nkpt}$    | هزینه حمل و نقل یک واحد محصول $p$ توسط وسیله نقلیه $t$ بین مراکز $n$ و $k$ |
| $TC_{nmpt}$    | هزینه حمل و نقل یک واحد محصول $p$ توسط وسیله نقلیه $t$ بین مراکز $n$ و $m$ |
| $TC_{lnpt}$    | هزینه حمل و نقل یک واحد محصول $p$ توسط وسیله نقلیه $t$ بین مراکز $l$ و $n$ |
| $C_{jp}$       | هزینه تولید یک واحد محصول $p$ در مرکز تولیدی $j$                           |
| $C_{kp}$       | هزینه توزیع یک واحد محصول $p$ در مرکز توزیع $k$                            |
| $C_{lp}$       | هزینه جمع آوری یک واحد محصول $p$ در مرکز جمع آوری $l$                      |
| $C_{np}$       | هزینه تعمیر بازرسی یک واحد محصول $p$ در مرکز تعمیر $n$                     |
| $C_{mp}$       | هزینه انهدام یک واحد محصول $p$ در مرکز انهدام $m$                          |
| $Cap_{ip}$     | ظرفیت تأمین کننده $i$ از محصول $p$                                         |
| $Cap_{jp}$     | ظرفیت مرکز تولیدی $j$ از محصول $p$                                         |
| $Cap_{kp}$     | ظرفیت مرکز توزیع $k$ از محصول $p$                                          |
| $Cap_{lp}$     | ظرفیت مرکز جمع آوری $l$ از محصول $p$                                       |
| $Cap_{np}$     | ظرفیت مرکز تعمیر $n$ از محصول $p$                                          |
| $Cap_{mp}$     | ظرفیت مرکز انهدام $m$ از محصول $p$                                         |
| $VA_{ihp}$     | حد پایین بازه تخفیف محصول $p$ از سوی تأمین کننده $i$ در سطح تخفیف $h$      |
| $P_{ihp}$      | قیمت خرید محصول $p$ از تأمین کننده $i$ در سطح تخفیف $h$                    |

#### • متغیرهای تصمیم

|              |                                                                                   |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| $X^1_{ijpt}$ | مقدار محصول $p$ انتقال یافته بین مراکز $i$ و $j$ توسط وسیله نقلیه $t$             |
| $X^2_{jkpt}$ | مقدار محصول $p$ تولید شده و انتقال یافته بین مراکز $j$ و $k$ توسط وسیله نقلیه $t$ |

|              |                                                                                           |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $X_{kcpt}^3$ | مقدار محصول $p$ انتقال یافته بین مراکز $k$ و $c$ توسط وسیله نقلیه $t$                     |
| $X_{clpt}^4$ | مقدار محصول $p$ برگشتی و انتقال یافته بین مراکز $c$ و $l$ توسط وسیله نقلیه $t$            |
| $X_{lnpt}^5$ | مقدار محصول $p$ انتقال یافته بین مراکز $l$ و $n$ توسط وسیله نقلیه $t$                     |
| $X_{nmpt}^6$ | مقدار محصول $p$ قراضه و انتقال یافته بین مراکز $n$ و $m$ توسط وسیله نقلیه $t$             |
| $X_{nkpt}^7$ | مقدار محصول $p$ تعمیر شده و انتقال یافته بین مراکز $n$ و $k$ توسط وسیله نقلیه $t$         |
| $X_{kcpt}^8$ | مقدار محصول $p$ تعمیر شده و انتقال یافته بین مراکز $k$ و $c$ توسط وسیله نقلیه $t$         |
| $Q_{ip}$     | مقدار کل خرید محصول $p$ از تأمین کننده $i$                                                |
| $Z_i$        | اگر تأمین کننده $i$ احداث گردد، یک و در غیر این صورت صفر                                  |
| $Z_j$        | اگر مرکز تولیدی $j$ احداث گردد، یک و در غیر این صورت صفر                                  |
| $Z_k$        | اگر مرکز توزیع $k$ احداث گردد، یک و در غیر این صورت صفر                                   |
| $Z_l$        | اگر مرکز جمع آوری $l$ احداث گردد، یک و در غیر این صورت صفر                                |
| $Z_n$        | اگر مرکز تعمیر $n$ احداث گردد، یک و در غیر این صورت صفر                                   |
| $Z_m$        | اگر مرکز انهدام $m$ احداث گردد، یک و در غیر این صورت صفر                                  |
| $A_{ihp}$    | اگر تأمین کننده $i$ در سطح تخفیف $h$ برای محصول $p$ انتخاب گردد، یک و در غیر این صورت صفر |

با توجه به مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم بیان شده، مساله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند محصولی به عنوان یک مدل احتمالی برنامه ریزی ریاضی غیرخطی عدد صحیح آمیخته به صورت ذیل مدل سازی می شود:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } E[W] = & \sum_{i=1}^I F_i Z_i + \sum_{j=1}^J F_j Z_j + \sum_{k=1}^K F_k Z_k + \sum_{l=1}^L F_l Z_l + \sum_{n=1}^N F_n Z_n + \\
 & \sum_{m=1}^M F_m Z_m + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T E[Tc]_{ijpt} X_{ijpt}^1 + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T E[Tc]_{jkpt} X_{jkpt}^2 + \\
 & \sum_{k=1}^K \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T E[Tc]_{kcpt} (X_{kcpt}^3 + X_{kcpt}^8) + \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T E[Tc]_{clpt} X_{clpt}^4 + \\
 & \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T E[Tc]_{lnpt} X_{lnpt}^5 + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T E[Tc]_{nkpt} X_{nkpt}^7 + \\
 & \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T E[Tc]_{nmpt} X_{nmpt}^6 + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T E[C]_{jp} X_{jkpt}^2 + \\
 & \sum_{k=1}^K \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T E[C]_{kp} (X_{kcpt}^3 + X_{kcpt}^8) + \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T E[C]_{lp} X_{clpt}^4 + \\
 & \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T E[C]_{np} X_{lnpt}^5 + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T E[C]_{mp} X_{nmpt}^6 + \\
 & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H E[P]_{ihp} A_{ihp} X_{ijpt}^1
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

s.t.

$$P\{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt} \mathfrak{r} + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt} \mathfrak{r} \geq Dem_{cp}\} \geq 1 - \alpha \quad \forall c, p \quad (2)$$

$$P\{\sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{clpt} \mathfrak{f} \geq R_{cp}\} \geq 1 - \beta \quad \forall c, p \quad (3)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T X_{clpt} \mathfrak{f} = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T X_{lnpt} \mathfrak{d} \quad \forall l, p \quad (4)$$

$$\varphi_{np} \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{lnpt} \mathfrak{d} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{nkpt} \mathfrak{v}^r \quad \forall n, p \quad (5)$$

$$(1 - \varphi_{np}) \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{lnpt} \mathfrak{d} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T X_{nmpt} \mathfrak{e} \quad \forall n, p \quad (6)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T X_{kcpt} \mathfrak{r} = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T X_{nkpt} \mathfrak{v}^r \quad \forall k, p \quad (7)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T X_{kcpt} \mathfrak{r} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkpt} \mathfrak{r} \quad \forall j, p \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T X_{ijpt} \mathfrak{v} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkpt} \mathfrak{r} \quad \forall j, p \quad (9)$$

$$A_{ihp} \mathfrak{v} A_{ihp} \leq Q_{ip} \quad \forall i, p, h \quad (10)$$

$$\sum_{h=1}^H A_{ihp} = Z_i \quad \forall i, p \quad (11)$$

$$Q_{ip} = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{ijpt} \mathfrak{v} \quad \forall i, p \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{ijpt} \mathfrak{v} \leq Cap_{ip} Z_i \quad \forall i, p \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{jkpt} \mathfrak{r} \leq Cap_{jp} Z_j \quad \forall j, p \quad (14)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T X_{kcpt} \mathfrak{r} + \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T X_{kcpt} \mathfrak{r} \leq Cap_{kp} Z_k \quad \forall k, p \quad (15)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T X_{clpt} \mathfrak{f} \leq Cap_{lp} Z_l \quad \forall l, p \quad (16)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X_{lnpt} \mathfrak{d} \leq Cap_{np} Z_n \quad \forall n, p \quad (17)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T X_{nmpt} \mathfrak{e} \leq Cap_{mp} Z_m \quad \forall m, p \quad (18)$$

$$X_{ijpt} \mathfrak{v}, X_{jkpt} \mathfrak{r}, X_{kcpt} \mathfrak{r}, X_{clpt} \mathfrak{f}, X_{lnpt} \mathfrak{d}, X_{nmpt} \mathfrak{e}, X_{nkpt} \mathfrak{v}^r, X_{kcpt} \mathfrak{r}, Q_{ip} \geq 0 \quad (19)$$

$$A_{ihp}, Z_i, Z_j, Z_k, Z_l, Z_n, Z_m \in [0, 1] \quad (20)$$

تابع هدف اول ارزش انتظاری هزینه‌های کل شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی را کمینه می‌کند. این هزینه‌ها به ترتیب شامل هزینه ثابت احداث مراکز و تسهیلات، هزینه‌های حمل‌ونقل محصولات، هزینه خرید محصول و هزینه‌های عملیاتی در هر کدام از مراکز می‌باشد. محدودیت (۲) بیان‌کننده میزان برآورده شدن تقاضای مشتری از همه محصولات درخواستی با احتمال  $1-\alpha$  می‌باشد. محدودیت (۳) میزان برگشت محصولات مصرف‌شده به مرکز جمع‌آوری را با احتمال  $1-\beta$  نشان می‌دهد. محدودیت (۴) نشان می‌دهد مرکز جمع‌آوری تمامی محصولات جمع‌شده را به مرکز تعمیر ارسال می‌کند. محدودیت‌های (۵) و (۶) به ترتیب درصدی از محصولات قابل تعمیر و قراضه را مشخص می‌کند. محدودیت (۷) نشان می‌دهد تمامی محصولات تعمیر شده توسط مرکز توزیع، برای فروش به مشتری ارسال می‌شود. محدودیت (۸) میزان تولید محصولات برای برآورده کردن تقاضا را نشان می‌دهد. محدودیت (۹) میزان ارسال محصولات را از تأمین‌کننده به مرکز تولیدی نشان می‌دهد که این محصولات بدون کسری به مرکز توزیع ارسال می‌گردد. محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۲) محدودیت‌های اعمال تخفیف را از سوی تأمین‌کننده نشان می‌دهد. به‌طوری‌که محدودیت (۱۰) کل میزان خرید محصول را از هر تأمین‌کننده و تنها در یک بازه تخفیف نشان می‌دهد. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند در صورتی که تأمین‌کننده‌ای انتخاب گردد، تنها از یک سطح تخفیف آن می‌توان محصولات نیمه ساخته خریداری کرد. محدودیت (۱۲) میزان انتقال محصولات را به هر مرکز تولیدی نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۳) تا (۱۸) نیز محدودیت‌های ظرفیت مراکز و تسهیلات را نشان می‌دهد و تضمین می‌کند تا زمانی که تسهیلی انتخاب نشده باشد، نمی‌توان از ظرفیت معادل آن استفاده نمود. محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) نیز نوع متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. برای قطعی‌سازی محدودیت‌های (۲) و (۳) معادل آن‌ها را در حالت قطعی در نظر می‌گیریم. برای این منظور برای محدودیت (۲) معادلات زیر را انجام می‌دهیم (علامت فلش بیان‌کننده معادل بودن رابطه قبل با رابطه روبه‌روی فلش می‌باشد).

$$\begin{aligned}
 & P\left\{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt}^r + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt}^r \geq Dem_{cp}\right\} \geq 1-\alpha \\
 \rightarrow & P\left\{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt}^r + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt}^r - Dem_{cp} \geq 0\right\} \geq 1-\alpha \\
 \rightarrow & Dem_{cp} - \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt}^r - \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt}^r \leq 0 \\
 \sim & N\left(\mu_{Dem} - \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt}^r - \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt}^r, Var_{Dem}\right) \\
 \rightarrow & P\left\{Z \leq \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt}^r + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt}^r - \mu_{Dem}}{\sqrt{Var_{Dem}}}\right\} \geq 1-\alpha \\
 \rightarrow & \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt}^r + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kcpt}^r - \mu_{Dem}}{\sqrt{Var_{Dem}}} \geq Z_{1-\alpha}
 \end{aligned}$$

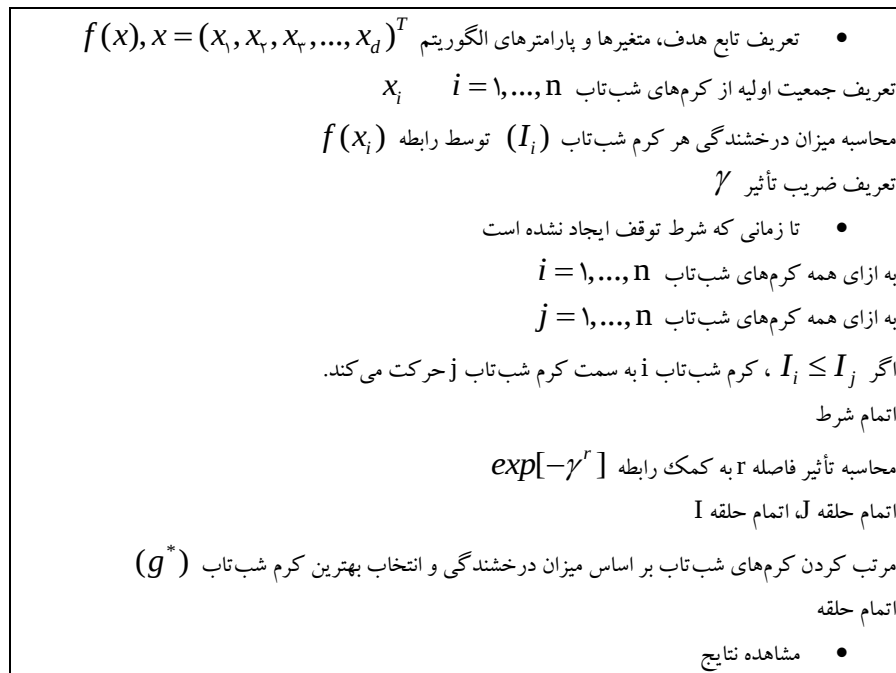
$$\rightarrow \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kpt}^3 + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X_{kpt}^r \geq Z_{1-\alpha} \sqrt{Var_{Dem}} + \mu_{Dem}$$

همین مراحل را نیز برای محدودیت (۳) انجام داده تا دو محدودیت فوق به صورت قطعی در مدل مورد نظر قرار گیرند.

مدل پیشنهادی این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته غیرخطی با  $PT * (IJ + JK + KC + CL + LM + MK + KN)$  متغیر پیوسته و  $(I + J + K + L + M + N + A)$  متغیر صفر و یک می‌باشد. NP-سخت بودن مسایل طراحی شبکه زنجیره تأمین در بسیاری از مقالات اثبات شده است. مدل پیشنهادی در این مقاله شامل دو مساله کلی است، مساله مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار و بهینه‌سازی جریان؛ بنابراین مدل به یک مساله مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار تبدیل می‌شود. درحالی‌که این مساله نیز یک مساله ان پی کامل است [۲۳]. با توجه به موارد ذکر شده، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی این مقاله نیز یک مدل NP-سخت می‌باشد. حل این مساله در اندازه بزرگ به روش دقیق بسیار زمان‌بر می‌باشد؛ بنابراین الگوریتم‌های فراابتکاری بسیاری برای این نوع مساله توسعه داده شده است تا جواب نزدیک به جواب بهینه را در زمان کم‌تر را ارائه نماید. در این مقاله یک الگوریتم کرم شب‌تاب بر اساس رمزگشایی بر پایه اولویت استفاده شده است. در پایان جهت بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم پیشنهادی با پنج الگوریتم (الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم جنگل، الگوریتم مورچگان، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم زنبور عسل) در هفت معیار مورد مقایسه قرار گرفته است.

### ۳ الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب به‌عنوان یکی از جدیدترین الگوریتم‌های الگوبرداری شده از طبیعت مطرح است که توانسته در عین سادگی و جذابیت توانایی خود را در حل مسایل بهینه‌سازی به اثبات برساند. بعضی از کرم‌های شب‌تاب مناطق گرمسیری می‌توانند عمل چشمک‌زدنشان را به‌طور هم‌زمان انجام دهند، بدین ترتیب رفتار خودسازمان‌دهی زیستی خود را نمایان می‌کنند. می‌دانیم که شدت نور در فاصله مشخص  $r$  از منبع نور از قانون مربع معکوس پیروی می‌کند. درواقع می‌توان گفت با توجه به عبارت  $I \propto 1/r^2$  شدت نور  $I$  با افزایش فاصله  $r$ ، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، هوا نور را جذب می‌کند که باعث ضعیف شدن نور با افزایش فاصله می‌گردد. ادغام این دو عامل باعث می‌شود که کرم‌های شب‌تاب، قدرت دیداری را در یک فاصله محدودی داشته باشند. با کشف ارتباط بین میزان نور کرم‌های شب‌تاب و تابع هدف مساله می‌توان در جهت بهینه‌سازی آن مساله اقدام نمود. آنچه در الگوریتم کرم شب‌تاب بسیار مهم است، تغییر شدت نور و فرمول‌بندی میزان جذابیت می‌باشد. برای سادگی، می‌توان فرض کرد که میزان جذابیت یک کرم شب‌تاب به‌وسیله میزان روشنایی آن، که به‌نوبه خود با مقدار تابع هدف متناظر آن جواب در ارتباط است، مشخص شود. بر اساس منطق الگوریتم کرم شب‌تاب، می‌توان گام‌های پایه‌ای این الگوریتم را طبق شبه کد زیر خلاصه کرد:



شکل ۲. شبه کد الگوریتم کرم شب‌تاب

### ۳-۱ ایجاد جواب اولیه بر مبنای رمزگشایی بر پایه اولویت و نحوه نمایش جواب

روش‌های متفاوتی برای حل مسایل زنجیره تأمین توسعه داده شده است که یکی از آن‌ها روش رمزگشایی ماتریس است که توسط میشلویچ، توسعه داده شده است. رویکرد این روش یک ماتریس  $|J| \times |K|$  می‌باشد که  $J$  تعداد منابع و  $K$  تعداد انبارها را نشان می‌دهد [۲۴].

در این مقاله روش حل بر پایه الگوریتم کرم شب‌تاب و الگوریتم ارایه شده توسط ژن و همکاران [۲۵]، بر پایه اولویت و الگوریتم رمزگشایی مساله زنجیره تأمین حلقه بسته بر اساس آرایه‌هایی با اندازه  $|J| + |K|$  و موقعیت همه سلول‌ها تعداد منابع و انبارها، به ارایه یک الگوریتم فراابتکاری جدید برای این مساله پرداختیم. در این الگوریتم در هر تکرار، گره (منبع یا انبار) با بزرگ‌ترین اولویت انتخاب می‌شود و به گره دیگر (انبار یا منبع) با کم‌ترین هزینه حمل و نقل وصل می‌شود. پس از آن کم‌ترین مقدار (ظرفیت منبع یا تقاضای انبار) به عنوان مقدار انتقال تخصیص داده می‌شود. این مساله تا زمانی که همه تقاضای انبارها برآورده نشده است ادامه می‌یابد، سپس منابعی که به انبارها متصل شده‌اند به عنوان تسهیلات بالفعل انتخاب می‌شود. در شکل ۳ الگوریتم پیشنهادی در این مقاله با رمزگشایی در مساله زنجیره تأمین حلقه بسته بر پایه اولویت مورد نظر قرار گرفته است.

$Z_i = \circ, Z_j = \circ, Z_k = \circ, Z_l = \circ, Z_n = \circ, Z_m = \circ$

**Step 1:**

$X_{ijpt}^1 = \circ, X_{jkpt}^2 = \circ, X_{kcpt}^3 = \circ, X_{clpt}^4 = \circ, X_{lmpt}^5 = \circ,$

$X_{nmpt}^6 = \circ, X_{nkpt}^7 = \circ, X_{kcpt}^8 = \circ, A_{ihp} = \circ,$

$\forall i \in I, j \in J, k \in K, c \in C, l \in L, m \in M, n \in N, h \in H$

**Step 2: For**  $p = 1$  to  $p = P$

calculate  $X\lambda_{kcpt}^T = (X\lambda_{kcpt}^r + X\varphi_{kcpt}), \forall k \in K, c \in C, t \in T$  using Gen and Cheng's decoding algorithm

**For**  $k = 1$  to  $k = K$

if  $\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T X\lambda_{kcpt}^T \geq \circ$  then  $Z_k = 1$

**Step 3: For**  $p = 1$  to  $p = P$

calculate  $X\varphi_{clpt}, \forall c \in C, l \in L, t \in T$  using Gen and Cheng's decoding algorithm

**For**  $l = 1$  to  $l = L$

if  $\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T X\varphi_{clpt} \geq \circ$  then  $Z_l = 1$

**Step 4: For**  $p = 1$  to  $p = P$

calculate  $X\Delta_{lnpt}, \forall l \in L, n \in N, t \in T$  using Gen and Cheng's decoding algorithm

**For**  $n = 1$  to  $n = N$

if  $\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T X\Delta_{lnpt} \geq \circ$  then  $Z_n = 1$

**Step 5: For**  $p = 1$  to  $p = P$

calculate  $X\varphi_{nkpt}^r, \forall n \in N, k \in K, t \in T$  using Gen and Cheng's decoding algorithm

**Step 6: For**  $p = 1$  to  $p = P$

calculate  $X\varphi_{jkpt} = (X\lambda_{kcpt}^T - X\varphi_{nkpt}^r), \forall j \in J, k \in K, t \in T$  using Gen and Cheng's decoding algorithm

**For**  $j = 1$  to  $j = J$

if  $\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T X\varphi_{jkpt} \geq \circ$  then  $Z_j = 1$

**Step 7: For**  $p = 1$  to  $p = P$

calculate  $X\lambda_{ijpt}, \forall i \in I, j \in J, t \in T$  using Gen and Cheng's decoding algorithm

**For**  $i = 1$  to  $i = I$

if  $\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T X\lambda_{ijpt} \geq \circ$  then  $Z_i = 1$

**Step 8: For**  $p = 1$  to  $p = P$

calculate  $X\varphi_{nmpt}, \forall n \in N, m \in M, t \in T$  using Gen and Cheng's decoding algorithm

**For**  $m = 1$  to  $m = M$

if  $\sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T X\varphi_{nmpt} \geq \circ$  then  $Z_m = 1$

**Step 9: For**  $h = 1$  to  $h = H$

**For**  $p = 1$  to  $p = P$

if  $VA_{iht} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X\lambda_{ijpt} \leq VA_{ih+1t}$  then  $A_{ihp} = 1$

**شکل ۳.** الگوریتم رمزگشایی مساله زنجیره تأمین حلقه بسته بر پایه اولویت مبتنی بر تحقیق چن و همکاران

بدین صورت شکل کلی جواب اولیه به کار رفته برای رمزگشایی به صورت یک ماتریس به صورت شکل ۴

می باشد. بخش های اشاره شده در شکل ۴ متناسب با الگوریتم رمزگشایی شده در شکل ۳ می باشد.

| تکرار | بخش ۱     | بخش ۲     | بخش ۳     | بخش ۴     | بخش ۵     | بخش ۶     | بخش ۷     |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| p     | $ K + C $ | $ C + L $ | $ L + N $ | $ N + K $ | $ K + J $ | $ I + J $ | $ N + M $ |

شکل ۴. جواب اولیه به کار رفته برای رمزگشایی بر پایه اولویت

## ۴ نتایج حل

در این بخش نتایج محاسباتی به منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی ارائه می شود. با توجه به بررسی های صورت گرفته توسط محققان این مقاله، اطلاعات واقعی در این زمینه برای اعلام به عنوان ورودی های مدل فوق به دست نیامد، از این رو برای اجرای مدل با ایجاد داده های تصادفی برای بررسی و صحت مدل پرداختیم. در گام اول جهت تایید مدل، یک مثال عددی کوچک شبیه سازی گردید و به کمک نرم افزار GAMS نتایج مدل تحلیل و اعتبار مدل مورد تایید قرار گرفت.

در ادامه ما به شبیه سازی ۱۵ مساله در ۱۰ اندازه با تکرار ۱۰۰ مرتبه از هر مساله (براساس پیشنهاد روش تاگوجی به جای انجام ۱۰۰۰ مرتبه تکرار) و انتخاب میانگین نتایج به اجرای مدل به کمک نرم افزار MATLAB پرداختیم. ابعاد مسایل طراحی شده به همراه جدول پارامترهای مورد نیاز به ترتیب در جدول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲. پارامترها و حدود داده های اسمی استفاده شده در مدل سازی

|                                         |                              |             |                  |
|-----------------------------------------|------------------------------|-------------|------------------|
| $Dem_{cp} \sim N(\mu_{Dem}, Var_{Dem})$ | $\sim((300, 400), (30, 40))$ | $TC_{ijpt}$ | $\sim(10, 20)$   |
| $R_{cp} \sim N(\mu_R, Var_R)$           | $\sim((30, 40), (3, 4))$     | $TC_{jkpt}$ | $\sim(10, 20)$   |
| $\varphi_{np}$                          | $\sim(0/50)$                 | $TC_{kcpt}$ | $\sim(10, 20)$   |
| $F_i$                                   | $\sim(1000000, 1200000)$     | $TC_{clpt}$ | $\sim(10, 20)$   |
| $F_i$                                   | $\sim(1000000, 1200000)$     | $TC_{nkpt}$ | $\sim(10, 20)$   |
| $F_k$                                   | $\sim(1000000, 1200000)$     | $TC_{nmpt}$ | $\sim(10, 20)$   |
| $F_l$                                   | $\sim(1000000, 1200000)$     | $TC_{lnpt}$ | $\sim(10, 20)$   |
| $F_n$                                   | $\sim(1000000, 1200000)$     | $C_{jp}$    | $\sim(5, 8)$     |
| $F_m$                                   | $\sim(1000000, 1200000)$     | $C_{kp}$    | $\sim(5, 8)$     |
| $Cap_{ip}$                              | $\sim(3600, 4500)$           | $C_{lp}$    | $\sim(5, 8)$     |
| $Cap_{jp}$                              | $\sim(3600, 4500)$           | $C_{np}$    | $\sim(5, 8)$     |
| $Cap_{kp}$                              | $\sim(3600, 4500)$           | $C_{mp}$    | $\sim(5, 8)$     |
| $Cap_{lp}$                              | $\sim(360, 450)$             | $Cap_{np}$  | $\sim(360, 450)$ |
| $Cap_{mp}$                              | $\sim(360, 450)$             | $P_{ihp}$   | $\sim(8/h, 9/h)$ |

جدول ۳. اندازه مسایل تولیدشده

| مساله نمونه                                                            |    |                                    |
|------------------------------------------------------------------------|----|------------------------------------|
| (  I  ,   J  ,   K  ,   C  ,   L  ,   M  ,   N  ,   P  ,   T  ,   H  ) | ۸  | (۱۱, ۱۰, ۷, ۱۴, ۷, ۶, ۶, ۵, ۴)     |
| ۱                                                                      | ۹  | (۱۲, ۱۰, ۷, ۱۵, ۸, ۶, ۸, ۷, ۶, ۴)  |
| ۲                                                                      | ۱۰ | (۱۲, ۱۰, ۹, ۱۸, ۸, ۷, ۸, ۷, ۶, ۴)  |
| ۳                                                                      | ۱۱ | (۱۳, ۱۲, ۱۱, ۱۹, ۸, ۸, ۸, ۷, ۶, ۵) |
| ۴                                                                      | ۱۲ | (۱۴, ۱۲, ۱۲, ۱۹, ۹, ۸, ۸, ۸, ۷, ۵) |
| ۵                                                                      | ۱۳ | (۱۳, ۱۳, ۱۲, ۲۴, ۹, ۸, ۹, ۹, ۸, ۵) |
| ۶                                                                      | ۱۴ | (۱۴, ۱۴, ۱۵, ۲۵, ۹, ۹, ۹, ۹, ۸, ۵) |
| ۷                                                                      | ۱۵ | (۱۵, ۱۵, ۱۶, ۲۷, ۹, ۹, ۹, ۹, ۹, ۶) |

شاید مهم ترین چالش در بهینه یابی توسط الگوریتم های فراابتکاری، انتخاب پارامترهای مناسب باشد. ما در این مقاله برای بهبود کارایی الگوریتم پیشنهادی به تنظیم پارامترهای اولیه به کمک روش طراحی آزمایش ها با استفاده از روش تاگوجی پرداختیم. براین اساس پیشنهاد روش تاگوجی برای این مساله  $(10^8)$  است که به معنی انجام ۱۰۰ آزمایش (به جای ۱۰۰۰ آزمایش کلی) با تعداد کرم شبتاب ۱۰ و ضریب تاثیر ۱ است که طبق جدول ۴ مورد نظر قرار گرفته است.

جدول ۴. تنظیم پارامتر الگوریتم کرم شب تاب به روش تاگوجی

|     |                  |
|-----|------------------|
| ۱۰۰ | تعداد تکرار      |
| ۱۰  | تعداد کرم شب تاب |
| ۰/۳ | ضریب معادله جذب  |
| ۱   | ضریب تأثیر       |

طبق داده های جدول ۲ و ابعاد مساله جدول ۳، ۱۵ مساله نمونه در ۱۰ اندازه با تکرار ۱۰۰ مرتبه تولید و توسط نرم افزار GAMS و الگوریتم کرم شب تاب حل شده است. نتایج حاصل از حل این دو راه حل در جدول ۵ مشاهده می شود. با توجه به اینکه هر مساله ۱۰۰ بار تکرار گردیده است؛ لذا در این جدول از میانگین نتایج تابع هدف و زمان حل برای مقایسه ۱۰ مساله نمونه استفاده شده است. برای مقایسه اختلاف بین دو راه حل از رابطه

$$gap\% = \frac{FA_{answer} - GAMS_{answer}}{GAMS_{answer}} \times 100$$

استفاده شده است.

جدول ۵. میانگین نتایج به دست آمده از انجام محاسبات

| مساله<br>نمونه | میانگین هزینه‌ها             |             | میانگین زمان حل              |         | شکاف  |
|----------------|------------------------------|-------------|------------------------------|---------|-------|
|                | الگوریتم کرم شب تاب پیشنهادی | GAMS        | الگوریتم کرم شب تاب پیشنهادی | GAMS    |       |
| ۱              | ۶۶۰۹۴۸۵/۶                    | ۶۶۰۹۴۸۵/۶   | ۱/۱۷                         | ۱/۰۳۸   | ۰     |
| ۲              | ۹۱۳۰۴۸۵/۵                    | ۹۱۲۵۴۷۵/۵   | ۳/۱۲                         | ۵/۲۶    | ۰/۰۵۴ |
| ۳              | ۱۲۵۴۴۰۸۲/۳                   | ۱۲۴۴۸۴۰۹/۷  | ۱۲/۵                         | ۲۷/۹    | ۰/۷۶  |
| ۴              | ۱۲۶۱۰۲۵۹/۴                   | ۱۲۵۵۴۵۸۸/۲  | ۷/۴                          | ۱۲/۶۴   | ۰/۴۴  |
| ۵              | ۱۲۹۷۹۸۲۶/۰                   | ۱۲۸۹۰۰۶۹/۳  | ۱۰/۳۶                        | ۲۵/۴۶   | ۰/۶۹  |
| ۶              | ۱۳۵۲۱۸۷۲/۶                   | ۱۳۴۶۰۰۸۶/۲  | ۱۸/۹۸                        | ۴۰/۶۹   | ۰/۴۵  |
| ۷              | ۱۴۵۹۴۲۶۸/۳                   | ۱۴۴۶۱۶۴۱/۲  | ۲۵/۷                         | ۸۶/۰۲   | ۰/۹۱  |
| ۸              | ۱۵۵۲۷۶۴۲/۸                   | ۱۵۳۸۲۴۵۸/۹  | ۴۱/۰۲                        | ۱۰۱/۲۳  | ۰/۹۴  |
| ۹              | ۱۷۴۵۹۱۲۶/۱                   | ۱۷۳۲۱۲۵۸۹/۷ | ۵۵/۱۵                        | ۴۰۳/۵۰  | ۰/۷۹  |
| ۱۰             | ۱۸۲۵۱۶۴۹/۱                   | ۱۸۰۹۶۵۱۰/۲  | ۹۷/۴۵                        | ۵۱۲/۶۹  | ۰/۸۵  |
| ۱۱             | ۱۹۴۹۲۶۱۸/۳                   | ۱۹۲۹۲۰۶۸/۸  | ۱۵۸/۴۵                       | ۱۲۵۹/۶  | ۱/۰۳  |
| ۱۲             | ۲۰۴۴۲۱۸۷/۲                   | ۲۰۰۵۵۸۲۹/۹  | ۲۱۰/۲۱                       | ۲۶۴۸/۸۸ | ۱/۸۹  |
| ۱۳             | ۲۱۴۹۵۷۴۵/۶                   | ۲۱۲۱۵۰۱۱/۲  | ۴۵۶/۲۳                       | ۴۶۹۸/۳  | ۱/۳۲  |
| ۱۴             | ۲۵۱۱۳۶۹۶/۲                   | ۲۴۸۳۲۴۲۲/۸  | ۶۰۲/۳۱                       | ۶۴۷۸/۰  | ۱/۱۳  |
| ۱۵             | ۲۸۴۷۱۵۹۸/۲                   | ۲۷۹۵۸۶۸۲/۴  | ۷۸۴/۹۹                       | ۷۶۹۵/۲۵ | ۱/۸۳  |

همان گونه که مشاهده می شود، نتایج به دست آمده از الگوریتم کرم شب تاب بسیار نزدیک به جواب های دقیق بوده و حتی در مساله نمونه (۱) نیز با آن برابر است. حداکثر اختلاف بین نتایج % ۱/۸۹ می باشد، این در حالی است که زمان حل مساله توسط الگوریتم کرم شب تاب کم تر از ۱۰ درصد نرم افزار GAMS بوده است، که نشان از کارایی بالای الگوریتم کرم شب تاب پیشنهادی دارد.

#### ۴-۱ مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم های مشابه

در این مقاله از ۷ معیار مطابق با جدول ۶ برای مقایسه روش پیشنهادی با سایر الگوریتم های مشابه استفاده شده است. الگوریتم های مورد مقایسه با الگوریتم پیشنهادی در این مقاله عبارتند از: الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم جنگل، الگوریتم مورچگان، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم زنبور عسل.

## جدول ۶. معیار ارزیابی پژوهش

| معیار ارزیابی                                  | توضیحات                                                                                             | رابطه                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| نرخ موفقیت <sup>۱</sup>                        | تعداد اجراهایی که بعد از آنها تمامی نقاط بهینه محلی و سراسری به دست می آیند.                        | –                                                                                                                                             |
| معیار کارایی موفق <sup>۲</sup>                 | هر چقدر مقدار کارایی موفق کمتر باشد، الگوریتم عملکرد بهتری داشته است.                               | $Success Performance = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} N_{FE}}{N_R \times SR}$                                                                         |
| میانگین تعداد نقاط بهینه یافت شده <sup>۳</sup> | تعداد نقاط بهینه سراسری و محلی در اجراهای مشخص                                                      | –                                                                                                                                             |
| نزدیکی جواب های یافت شده <sup>۴</sup>          | نزدیکی جواب های یافت شده به جواب های اصلی                                                           | $SA = \frac{1}{\sum_{r=1}^{N_R} Ex(N_{op_r}^M)} \sum_{r=1}^{N_R} Ex(N_{op_r}^M) \frac{1}{N_{op_r}^M} \sum_{i=1}^{N_{op_r}^M}  F_i^M - f_i^M $ |
| بیشینه بهینه یافت شده <sup>۵</sup>             | مجموع برازندگی نقاط بهینه تا $r$ امین اجرا بر مجموع مقدار برازندگی نقاط بهینه اصلی تا $r$ امین اجرا | $MPR = \frac{1}{N_R} \sum_{r=1}^{N_R} \left( \frac{\sum_{i=1}^{N_{op_r}} f_i}{\sum_{i=1}^{N_{AP}} F_i} \right)$                               |
| نقاط بهینه یافت شده <sup>۶</sup>               | نقاط بهینه به دست آمده تا $r$ امین اجرا بر نقاط بهینه اصلی تا $r$ امین اجرا                         | $FPR = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{N_R} \frac{N_{op_r}}{N_{AP}}$                                                                                |
| زمان اجرا <sup>۷</sup>                         | زمان بین شروع و پایان کار الگوریتم                                                                  | –                                                                                                                                             |

یافته های مندرج در جدول ۷ نشان می دهد که روش پیشنهادی در مقوله بهترین هزینه اجرا نسبت به دیگر الگوریتم ها عملکرد بهتری داشته است.

## جدول ۷. مقایسه روش پیشنهادی و روش های مشابه براساس خروجی بهترین هزینه

| الگوریتم   | الگوریتم  | الگوریتم   | الگوریتم   | الگوریتم    | الگوریتم |
|------------|-----------|------------|------------|-------------|----------|
| زنبور عسل  | ژنتیک     | مورچگان    | جنگل       | ازدحام ذرات | پیشنهادی |
| رتبه پنجم  | رتبه ششم  | رتبه چهارم | رتبه سوم   | رتبه دوم    | رتبه اول |
| رتبه چهارم | رتبه ششم  | رتبه پنجم  | رتبه دوم   | رتبه سوم    | رتبه اول |
| رتبه دوم   | رتبه ششم  | رتبه پنجم  | رتبه چهارم | رتبه سوم    | رتبه اول |
| رتبه ششم   | رتبه پنجم | رتبه چهارم | رتبه سوم   | رتبه اول    | رتبه دوم |
| رتبه چهارم | رتبه ششم  | رتبه سوم   | رتبه پنجم  | رتبه دوم    | رتبه اول |
| رتبه دوم   | رتبه ششم  | رتبه پنجم  | رتبه سوم   | رتبه چهارم  | رتبه اول |
| رتبه پنجم  | رتبه ششم  | رتبه چهارم | رتبه سوم   | رتبه دوم    | رتبه اول |

<sup>1</sup> Success rate

<sup>2</sup> Performance

<sup>3</sup> Average Number of Optima Found

<sup>4</sup> Success Accuracy

<sup>5</sup> Maximum Peak Ratio

<sup>6</sup> Found Peak Ratio

<sup>7</sup> Run time

یافته‌های مندرج در جدول ۸ نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقوله زمان نخستین اجرا نسبت به دیگر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری داشته است. جدول ۸ روش‌های بررسی شده را به ترتیب خروجی زمان نخستین اجرا برای هر یک از معیارهای ارزیابی مرتب‌سازی کرده است.

**جدول ۸.** مقایسه روش پیشنهادی و روش‌های مشابه براساس خروجی زمان

| الگوریتم  | الگوریتم | الگوریتم | الگوریتم | الگوریتم    | الگوریتم | الگوریتم                          |
|-----------|----------|----------|----------|-------------|----------|-----------------------------------|
| زنبور عسل | ژنتیک    | مورچگان  | جنگل     | ازدحام ذرات | پیشنهادی | الگوریتم                          |
| سومی      | پنجمی    | ششمی     | بیش‌ترین | دومی        | بیش‌ترین | نرخ موفقیت                        |
| ششمی      | پنجمی    | چهارمی   | سومی     | دومی        | بیش‌ترین | معیار کارایی موفق                 |
| پنجمی     | ششمی     | چهارمی   | سومی     | دومی        | بیش‌ترین | میانگین تعداد نقاط بهینه یافت شده |
| ششمی      | پنجمی    | چهارمی   | سومی     | بیش‌ترین    | دومی     | نزدیکی جواب‌های یافت شده          |
| ششمی      | پنجمی    | چهارمی   | سومی     | دومی        | بیش‌ترین | بیشینه بهینه یافت شده             |
| ششمی      | پنجمی    | چهارمی   | سومی     | بیش‌ترین    | بیش‌ترین | زمان اجرا                         |
| پنجمی     | بیش‌ترین | چهارمی   | ششمی     | دومی        | سومی     | نقاط بهینه یافت شده               |

یافته‌های مندرج در جدول ۹ نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقوله بهترین گره نسبت به دیگر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری داشته است. جدول ۹ روش‌های بررسی شده را به ترتیب خروجی بهترین گره برای هر یک از معیارهای ارزیابی مرتب‌سازی کرده است.

**جدول ۹.** مقایسه روش پیشنهادی و روش‌های مشابه براساس خروجی بهترین گره

| الگوریتم  | الگوریتم | الگوریتم | الگوریتم | الگوریتم    | الگوریتم | الگوریتم                          |
|-----------|----------|----------|----------|-------------|----------|-----------------------------------|
| زنبور عسل | ژنتیک    | مورچگان  | جنگل     | ازدحام ذرات | پیشنهادی | الگوریتم                          |
| سومی      | پنجمی    | چهارمی   | ششمی     | دومی        | بیش‌ترین | نرخ موفقیت                        |
| ششمی      | پنجمی    | چهارمی   | سومی     | دومی        | بیش‌ترین | معیار کارایی موفق                 |
| پنجمی     | ششمی     | چهارمی   | سومی     | دومی        | بیش‌ترین | میانگین تعداد نقاط بهینه یافت شده |
| سومی      | ششمی     | پنجمی    | چهارمی   | بیش‌ترین    | دومی     | نزدیکی جواب‌های یافت شده          |
| ششمی      | پنجمی    | چهارمی   | سومی     | دومی        | بیش‌ترین | بیشینه بهینه یافت شده             |
| پنجمی     | ششمی     | چهارمی   | سومی     | دومی        | بیش‌ترین | زمان اجرا                         |
| پنجمی     | سومی     | چهارمی   | ششمی     | دومی        | بیش‌ترین | نقاط بهینه یافت شده               |

## ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته غیرخطی عدد صحیح آمیخته چند محصولی احتمالی با امکان ارایه تخفیف خرید کالا مطرح گردید. به دلیل NP-سخت بودن مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین، از یک الگوریتم کرم شب‌تاب با رمزگشایی بر پایه اولویت به عنوان یک الگوریتم ترکیبی جدید استفاده شد. نتایج محاسباتی از حل ۱۵ مساله نمونه در ۱۰ اندازه متفاوت با اجرای ۱۰۰ مرتبه از هر مساله (بر مبنای پیشنهاد روش تاگوچی) به دست آمد. نتایج حاصل نشان داد که الگوریتم به کاررفته از کارایی بالایی برخوردار می‌باشد و زمان

حل توسط الگوریتم پیشنهادی کم‌تر از ۱۰ درصد زمان محاسباتی نرم‌افزار *GAMS* گزارش شده است. ما در مرحله آخر الگوریتم پیشنهادی را با پنج الگوریتم براساس هفت تابع معیار مورد مقایسه قرار دادیم که نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌های پیشنهادی می‌باشد.

## منابع

- [۱۹] فرخ، مجتبی، آذر، عادل، جندقی، غلامرضا. (۱۳۹۵). توسعه یک رویکرد برنامه ریزی فازی استوار برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته. فصلنامه چشم انداز مدیریت صنعتی، شماره ۲۲، ۹-۴۳.
- [۲۰] قهرمانی نهر، جاوید، قدرت نما، علی، ایزدبخش، حمیدرضا، توکلی مقدم، رضا. (۱۳۹۷). طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز چندهدفه چند محصولی و چند دوره‌ای با در نظر گرفتن تخفیف در شرایط عدم قطعیت. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۶(۱۳)، ۱۱۹-۱۳۷.
- [۲۱] شهروزی، محسن، صالحی، علیرضا. (۱۳۹۶). شاخص‌های عملکردی برای مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری با تفاوت‌های پایه در عملگرها. اولین کنفرانس بین‌المللی محاسبات نرم، گیلان، ایران.
- [1] Bouzembrak, Y., Allaoui, H., Goncalves, G., & Bouchriha, H. (2011). A multi-objective green supply chain network design. 4th International Conference on Logistics. (pp. 357-361). IEEE.
- [2] Aravendan, M., & Panneerselvam, R. (2014). Literature Review on Network Design Problems in Closed Loop and Reverse Supply Chains. Intelligent Information Management, 2014 .
- [3] Kannan, G., Noorul Haq, A., & Devika, M. (2009). Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimisation. International Journal of Production Research, 47(5), 1175-1200 .
- [4] Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-ruwaard, J. M., & Wassenhove, L. N. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. Production and operations management, 10(2), 156-173 .
- [5] Schultmann, F., Engels, B., & Rentz, O. (2003). Closed-loop supply chains for spent batteries. Interfaces, 33(6), 57-71 .
- [6] Inderfurth, K. (2005). Impact of uncertainties on recovery behavior in a remanufacturing environment: a numerical analysis. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 35(5), 318-336 .
- [7] Chouinard, M., D'Amours, S., & Ait-Kadi, D. (2008). A stochastic programming approach for designing supply loops. International Journal of Production Economics, 113(2), 657-677 .
- [8] Lee, C., & Chan, T. (2009). Development of RFID-based reverse logistics system. Expert Systems with Applications, 36(5), 9299-9307 .
- [9] Sasikumar, P., Kannan, G., & Haq, A. N. (2010). A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery—a case of truck tire remanufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 49(9-12), 1223-1234.
- [10] Pishvae, M., & Torabi, S. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. Fuzzy Sets and Systems, 161(20), 2668-2683 .
- [11] Khajavi, L. T., Seyed-Hosseini, S.-M., & Makui, A. (2011). An integrated forward/reverse logistics network optimization model for multi-stage capacitated supply chain. iBusiness, 3(02), 229 .
- [12] Das, K., & Chowdhury, A. H. (2012). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. International Journal of Production Economics, 135(1), 209-221 .
- [13] Mahmoudzadeh, M., Mansour, S., & Karimi, B. (2013). To develop a third-party reverse logistics network for end-of-life vehicles in Iran. Resources, Conservation and Recycling, 78, 1-14 .
- [14] Donmez, I., & Turkay, M. (2013). Design of reverse logistics network for waste batteries with an application in Turkey. Chemical Engineering Transactions, 35, 1393-1398 .
- [15] Özceylan, E., Paksoy, T., & Bektaş, T. (2014). Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 61, 142-164 .

- [16] Garg, K., Agarwal, V., & Jha, P. (2015). Transportation Decision Making Through Logistics Outsourcing and 3PL Selection in an Integrated Closed-Loop Supply Chain. 4<sup>th</sup> International Conference on Soft Computing for Problem Solving.
- [17] Serdar, E., Ashhab, M.S. (2016). Supply Chain Network Design Optimization Model for Multi-period Multi-product. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 16(1), 122-140.
- [18] Keshavarz Ghorabae, M., Amiri, M., Ohfat, I., Firouzabadi, A. (2017). Designing a multi-product multi-period supply chain network with reverse logistics and multiple objectives under uncertainty. *Journal Technological and Economic Development of Economy*, 23 (3).
- [22] Liao, Z., Rittscher, J, (2007). Integration of supplier selection, procurement lot sizing and carrier selection under dynamic demand conditions. *Int. J. Production Economics*, 107, 502–510.
- [23] Davis, P., & Ray, T. (1969). A branch-bound algorithm for the capacitated facilities location problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, 16(3), 331-344 .
- [24] Michalewicz, Z., Vignaux, G. A., & Hobbs, M. (1991). A nonstandard genetic algorithm for the nonlinear transportation problem. *ORSA Journal on Computing*, 3(4), 307-316 .
- [25] Gen, M., Altiparmak, F., & Lin, L. (2006). A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding. *OR spectrum*, 28(3), 337-3 .