



# بهبود اثربخشی و کارایی زنجیره‌ی تامین حلقه‌ی بسته: رویکرد الگوریتم بهینه‌سازی وال و رمزگذاری جدید مبتنی بر اولویت جاوید قهرمانی نهر\*

پژوهشکده توسعه و برنامه‌ریزی جهاد دانشگاهی، تبریز، ایران.

## چکیده

با گسترش و افزایش شدت رقابت، مدیریت زنجیره تامین به یکی از مسائل اساسی پیش روی بنگاه‌های اقتصادی تبدیل شده است، طوری که همه فعالیت‌های سازمان‌ها را به منظور تولید محصولات، بهبود کیفیت، کاهش هزینه‌ها و ارائه خدمات مورد نیاز مشتریان تحت تاثیر قرار داده است. در این تحقیق یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته شامل سطوح مراکز تولیدی، مناطق مشتری، مراکز جمع‌آوری و مراکز انهدام و در حالت قطعی در نظر گرفته شده است. هدف اصلی این مقاله، تعیین تعداد و مکان بهینه تسهیلات بالقوه و همچنین تعیین مقدار بهینه جریان با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌های کل شبکه زنجیره تامین می‌باشد. برای حل این مدل از یک الگوریتم فرا ابتکاری جدید به نام الگوریتم بهینه‌سازی وال با رمزگذاری جدید مبتنی بر اولویت استفاده شده است. برای نشان دادن کارایی بالای رمزگذاری مبتنی بر اولویت، ۲۱ مسئله نمونه در سه سایز کوچک، متوسط و بزرگ طراحی شده است و نتایج به دست آمده از این رمزگذاری و سایر رمزگذاری‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. مقایسات بین رمزگذاری‌های مسئله، با در نظر گرفتن دو شاخص میانگین تابع هدف و میانگین زمان محاسباتی، نشان از کارایی بالای رمزگذاری پیشنهادی در مقایسه با دیگر رمزگذاری‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: شبکه زنجیره تامین حلقه بسته، الگوریتم بهینه‌سازی وال، رمزگذاری جدید مبتنی بر اولویت.

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

اصلاح: ۱۳۹۸/۱۱/۱۷

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۷

## ۱- مقدمه

زنجیره تامین، یک مجموعه از سازمان‌هایی است که به وسیله جریان‌های مواد، اطلاعات و جریان‌های مالی به یکدیگر مرتبط می‌شوند، این سازمان‌ها می‌توانند شامل بنگاه‌هایی باشند که مواد خام، قطعات و محصولات را تولید و خدماتی از قبیل توزیع، انبارش، عمده‌فروشی و خرده‌فروشی را ارائه دهند. در این مجموعه مشتریان نهایی، آخرین سطح یک زنجیره و یکی از اعضای این سازمان‌ها در نظر گرفته می‌شوند. شبکه‌های زنجیره تامین به چند دسته کلی طبقه‌بندی می‌شوند: زنجیره تامین روبه‌جلو یک سیستم یکپارچه تشکیل شده از اجزایی همانند مواد خام، تسهیلات تولیدی، خدمات توزیع و مشتریانی می‌باشد که به وسیله جریان مواد در زنجیره روبه‌جلو و جریان اطلاعات در زنجیره معکوس با یکدیگر در ارتباط هستند. زنجیره تامین معکوس به حرکت جریان مواد از سوی مشتری به تولیدکننده اشاره دارد. این زنجیره برخلاف زنجیره تامین سنتی که در آن حرکت جریان مواد از سمت تولیدکننده به مشتری می‌باشد، طراحی می‌گردد که محصولات مصرف شده از سوی مصرف کننده نهایی به مراکز تولیدی در جریان است. از یکپارچگی زنجیره‌های تامین روبه‌جلو و معکوس، زنجیره تامین حلقه بسته نتیجه می‌شود.

مسئله طراحی شبکه یکی از جامع‌ترین مسائل تصمیم‌گیری استراتژیک است که به بهینه‌سازی برای عملیات بلندمدت کارآمد کل زنجیره تامین نیاز دارد. طراحی شبکه، تعداد، موقعیت، ظرفیت و انواع کارخانه‌ها، انبارها و مراکز توزیع‌کننده را مشخص می‌نماید. همچنین کانال‌های توزیع و مقدار مواد و اقلام برای مصرف، تولید و حرکت از تولیدکننده به مشتریان را تعیین می‌کند (قهرمانی نهر و همکاران، ۲۰۱۹).



با توجه به اهمیت شبکه‌های زنجیره تامین در دنیای امروزی، طراحی مدل‌های ریاضی شبکه زنجیره تامین نیاز مبرم هر سازمان و شرکت می‌باشد که طراحی مناسب این شبکه منجر به افزایش اثربخشی و کارایی از طریق کاهش هزینه‌های طراحی، کاهش زمان تولید، تخصیص مناسب جریان کالا و غیره خواهد شد. از سویی پس از طراحی شبکه‌های زنجیره تامین، بایستی با ابزارهای مناسب در پی بهینه‌سازی مدل طراحی شده برآمد. امروزه نرم‌افزارهایی همانند *GAMS*، *LINDO*، *LINGO* و *CPLEX* جهت بهینه‌سازی مسائل تحقیق در عملیات من جمله مدل‌های شبکه زنجیره تامین به کار می‌روند، که هرکدام از این نرم‌افزارها دارای محدودیت‌هایی نظیر محدودیت در حداکثر تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری ورودی، محدودیت در حداکثر زمان حل و غیره هستند. لذا برای رفع این مشکل و حل مسائل شبکه زنجیره تامین در سایزهای بزرگتر، بایستی از الگوریتم‌های فراابتکاری با رمزگذاری مناسب استفاده شود تا در عین کاهش زمان حل، به جواب نزدیک به بهینه نیز برسد (پسنیده و اسدی، ۲۰۱۶). الگوریتم‌های فراابتکاری نوعی ابزار حل برای حل مسائل بهینه‌سازی هستند که با ایجاد جواب تصادفی در کمترین زمان به جواب بهینه و یا نزدیک به بهینه می‌رسند. این الگوریتم‌ها بر اساس عملگرهای خود، با تغییر جواب تصادفی ایجاد شده به سمت بهینگی حرکت می‌کنند. از این رو مهم‌ترین مسئله بین خود مسئله بهینه‌سازی و جواب تصادفی الگوریتم فراابتکاری، رمزگذاری می‌باشد. رمزگذاری مهم‌ترین بخش هر الگوریتم بوده و ارتباط بین مسئله طراحی شده و جواب تصادفی الگوریتم را برقرار می‌کند. در صورتی که این رمزگذاری به درستی طراحی نشود، الگوریتم هیچ موقع به جواب‌های مطلوب نخواهد رسید. پس در نتیجه بایستی به بحث رمزگذاری در الگوریتم‌های فراابتکاری توجه نمود (زندیه و چنسلوی، ۲۰۱۵). در این مقاله، الگوریتم بهینه‌سازی وال که یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسائل در فضای پیوسته می‌باشد، به کار رفته است. این الگوریتم توانایی تغییر جواب تصادفی برای رسیدن به جواب بهینه را با دو عملگر مختلف خود امکان‌پذیر می‌سازد. عملگرهای الگوریتم وال برخلاف سایر الگوریتم‌ها به گونه‌ای طراحی شده که توانایی خروج سریع از بهینگی محلی به بهینگی سراسری را دارد. به عبارت دیگر عملگرهای این الگوریتم با تغییر جواب تصادفی به دو صورت "به سمت بالا-مارپیچی" و "حلقه دابل"، منجر به خروج جواب از دام بهینگی محلی می‌شود که یک مزیت نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری می‌باشد. بنابراین، در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای طراحی یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته شامل سطوح مراکز تولیدی، مراکز جمع‌آوری، مراکز انهدام و مناطق مشتری در نظر گرفته شده است. این مدل شامل دو مسئله مختلف مکان‌یابی تسهیلات و تعیین مقدار بهینه جریان بین تسهیلات می‌باشد که برای حل مدل از الگوریتم بهینه‌سازی وال با رمزگشایی جدید مبتنی بر اولویت استفاده شده است.

## ۲- مرور ادبیات

در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت روزافزون مسائل طراحی شبکه‌های زنجیره تامین، مقالات متعددی در این زمینه منتشر شده است. کنان و همکاران یک مرور ادبیات بر روی طراحی مدل‌های شبکه‌های لجستیک معکوس و حلقه بسته انجام دادند. آن‌ها ۳۸۲ مقاله منتشر شده بین سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۳ را بر اساس سال، روش حل، توابع هدف دسته‌بندی کردند (گویندان و همکاران، ۲۰۱۵). ابتدا یک مدل ریاضی برای شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با ارائه یک رویه ابتکاری الگوریتم ژنتیک فرمول‌بندی شد (لی و همکاران، ۲۰۰۹). مدل ارائه شده گرچه می‌توانست تعداد بهینه مراکز پردازش و جداسازی را تعیین کند اما در مورد بخش‌های تامین‌کننده ناکارآمد بود. در ادامه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح آمیخته که تعداد مراکز جمع‌آوری و بازیافت در آن تصمیم‌گیری می‌شد، ارائه شد (آچیل‌اس و همکاران، ۲۰۱۰). این مدل به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم برای سیستم سیاست‌گذاری و بهینه‌سازی محصولات الکترونیکی در شبکه لجستیک معکوس پیشنهاد داده شده بود. هم چنین یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی صحیح آمیخته برای شبکه لجستیک معکوس در سطح تصمیم‌گیری استراتژیک ارائه گردید (داس و همکاران، ۲۰۱۲). آن‌ها یک رویکرد در مدل پیشنهادی ارائه دادند که خرده‌فروش‌ها به عنوان یک کانال دوطرفه برای ساخت محصولات جدید، جمع‌آوری محصولات مصرف‌شده و بازاریابی دوباره محصولات بازیافت شده به کار می‌گرفت. یک مدل چندهدفه برای طراحی شبکه پست ارائه گردید (اسکندرپور و همکاران، ۲۰۱۳). مدل ارائه شده هزینه‌های ثابت کل، هزینه‌های متغیر، تأخیر کل و آلودگی‌های زیست‌محیطی را کمینه می‌کرد. در تحقیقی به طراحی شبکه زنجیره تامین چهار سطحی برای انتقال داروها از تامین‌کننده به مشتریان (بیمارستان‌ها و مراکز درمانی) تحت عدم قطعیت تقاضا پرداخته گردید (موسی زاده و همکاران، ۲۰۱۵).

هدف آن‌ها در این مقاله ارائه یک مدل بهینه‌سازی استوار امکانی برای مسئله دوهدفه زنجیره تامین چهار سطحی بود. اهداف این مقاله کاهش هزینه‌های لجستیکی شبکه و حداقل کردن حداکثر تقاضای ازدست‌رفته بود. در نهایت آن‌ها مدل پیشنهادی خود را بر روی یک شرکت دارویی معتبر اجرا کردند.



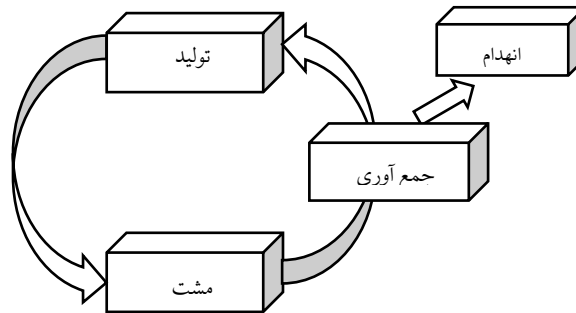
در مقاله‌ای به بررسی یک مدل برنامه‌ریزی توزیع-تولید و موجودی در شرایط عدم قطعیت با حداکثر سازی ارزش خالص فعلی در شبکه زنجیره تامین حلقه بسته پرداخته شد (طالعی زاده و نوبیل، ۲۰۱۷). آن‌ها یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با چندین تامین‌کننده، چندین کارخانه تولیدی و مشتری طراحی نمودند که هدف آن کاهش هزینه‌های طراحی شبکه با در نظر گرفتن افزایش ارزش خالص فعلی بود. یک مدل قطعی برای تصمیمات یکپارچه مکان‌یابی-موجودی و قیمت‌گذاری در شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ارائه گردید (وحدانی و احمدزاده، ۲۰۱۷). هدف اصلی آن‌ها تصمیم‌گیری بر روی مکان‌یابی بهینه تسهیلات با در نظر گرفتن هزینه‌های موجودی و قیمت‌گذاری محصولات بود. آن‌ها برای حل مدل پیشنهادی خود از الگوریتم‌های ژنتیک، کرم شب‌تاب و الگوریتم رقابت استعماری استفاده کردند. همچنین یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با استفاده از الگوریتم لیگ قهرمانان ارائه گردید (قهرمانی و همکاران، ۲۰۱۸). پارامترهای مدل طراحی شده توسط آن‌ها به صورت قطعی بود و هدف اصلی آن افزایش کارایی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با اعمال کاهش هزینه‌های کل شبکه زنجیره تامین بود. همچنین به طراحی یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته چندهدفه سبز پرداخته شد (راد و نهاوندی، ۲۰۱۸). توابع هدف این مقاله شامل کاهش هزینه‌های اقتصادی، کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای و برآورده سازی تقاضای مشتریان بود. آن‌ها همچنین از الگوریتم کلونی مورچگان برای حل مسئله خود استفاده کردند. سپس طراحی یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی ژنتیک برای صنعت تابر ترکیه پیشنهاد گردید (چن و همکاران، ۲۰۱۸). هدف اصلی آن‌ها تعیین تعداد مکان بهینه تسهیلات و مقدار بهینه جریان کالا بین تسهیلات باهدف کاهش هزینه‌های لجستیکی بود. در مقاله‌ای به ارائه یک مدل ریاضی جهت انتخاب تامین‌کننده در زنجیره تامین با در نظرگیری مسائل کنترل موجودی و قیمت‌گذاری پرداخته شد (محمودی و همکاران، ۱۳۹۸). در این مقاله برای ارزیابی صحت مدل و اعتبار آن از داده‌های واقعی شرکت صنایع هفت الماس شامل مواد اولیه‌ی ورودی (هات رول) و محصولات (ورق گالوانیزه) استفاده شده است. مدل ارائه‌شده در محیط نرم‌افزار GAMS کدنویسی شده و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در مقاله‌ای یک مدل برنامه‌ریزی چند هدفه برای تعیین کارایی و بازده به مقیاس زنجیره تامین دو مرحله‌ای در شرکت‌های رزین ایران پرداخته گردید (رحیمی و حسین زاده، ۱۳۹۶). در این مقاله، دو رویکرد برای محاسبه کارایی مدیریت زنجیره تامین به صورت فرآیند شبکه‌ای در نظر گرفته شده است. در رویکرد نخست، تعمیم مدل مجموع وزن‌دار برای محاسبه کارایی و بازده به مقیاس زنجیره تامین با فرآیند دومرحله‌ای به صورت تک هدفه در نظر گرفته شده است. در رویکرد دوم، مدل مجموع وزن‌دار برای محاسبه کارایی و بازده به مقیاس زنجیره تامین با فرآیند دومرحله‌ای به صورت یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه ارائه شده است.

### ۳- تعریف مسئله و مدل‌سازی

در این مقاله، یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته عمومی در نظر گرفته شده است. شبکه زنجیره روبه‌جلو شامل مراکز تولیدی و مناطق مشتری و شبکه زنجیره معکوس شامل مراکز جمع‌آوری و انهدام می‌باشد. مطابق با شکل (۱)، مراکز تولیدی، پس از تولید محصولات جدید و بازتولید محصولات برگشت داده‌شده، آن‌ها را به مناطق مشتری ارسال می‌کنند. سپس مراکز جمع‌آوری، محصولات برگشت داده‌شده از مشتری را جمع‌آوری کرده و پس از بازرسی، محصولات قابل استفاده مجدد را جهت بازتولید به مراکز تولیدی و محصولات قراضه را جهت انهدام به مراکز انهدام ارسال می‌کند. برای تعیین محدوده مطالعه، مفروضات زیر برای مدل طراحی شده در نظر گرفته شده است:

- مدل طراحی شده تک دوره‌ای می‌باشد.
- همه تسهیلات دارای ظرفیت محدود و از قبل تعیین شده می‌باشند.
- مکان همه تسهیلات بالقوه نامعلوم می‌باشد.
- تقاضای همه مشتریان بایستی برآورده گردد و تمامی محصولات برگشت داده‌شده از مشتری جمع‌آوری گردد.
- مکان مشتریان ثابت و از پیش تعیین شده می‌باشد.

با توجه به مفروضات فوق، مهم‌ترین مسئله در این تحقیق مکان‌یابی تسهیلات بالقوه شامل مراکز تولیدی، مراکز جمع‌آوری و مراکز انهدام و همچنین تعیین مقدار بهینه جریان بین مراکز می‌باشد. مدل شبکه زنجیره تامین به‌عنوان یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح



شکل ۱- رابطه بین سطح خدمت به مشتری.

مجموعه‌ها:

- $I$  مجموعه مراکز تولیدی بالقوه  $\forall i \in I$ .
- $J$  مجموعه مناطق مشتری ثابت  $\forall j \in J$ .
- $K$  مجموعه مراکز جمع‌آوری بالقوه  $\forall k \in K$ .
- $L$  مجموعه مراکز انهدام بالقوه  $\forall l \in L$ .

پارامترها.

- $Tij_{ij}$  هزینه حمل و نقل بین مرکز تولیدی  $i$  و منطقه مشتری  $j$ .
- $Tjk_{jk}$  هزینه حمل و نقل بین منطقه مشتری  $j$  و مرکز جمع‌آوری  $k$ .
- $Tki_{ki}$  هزینه حمل و نقل بین مرکز جمع‌آوری  $k$  و مرکز تولیدی  $i$ .
- $Tkl_{kl}$  هزینه حمل و نقل بین مرکز جمع‌آوری  $k$  و مرکز انهدام  $l$ .
- $E_i$  هزینه ثابت تأسیس مرکز تولیدی  $i$ .
- $F_k$  هزینه ثابت تأسیس مرکز جمع‌آوری  $k$ .
- $G_l$  هزینه ثابت تأسیس مرکز انهدام  $l$ .
- $Capi_i$  ظرفیت مرکز تولید  $i$ .
- $Capk_k$  ظرفیت مرکز جمع‌آوری  $k$ .
- $Capl_l$  ظرفیت مرکز انهدام  $l$ .
- $Dem_j$  تقاضای منطقه مشتری  $j$ .
- $r_j$  مقدار برگشتی محصولات از منطقه مشتری  $j$ .
- $\beta$  حداقل کسر انهدام محصولات.

متغیرهای تصمیم‌گیری.

- $X_{ij}$  مقدار محصول تولیدی و بازتولید انتقال یافته بین مرکز تولیدی  $i$  و منطقه مشتری  $j$ .
- $Y_{jk}$  مقدار محصول برگشت داده شده و انتقال یافته بین منطقه مشتری  $j$  و مرکز جمع‌آوری  $k$ .
- $S_{ki}$  مقدار محصول قابل استفاده مجدد و انتقال یافته از مرکز جمع‌آوری  $k$  و مرکز تولیدی  $i$ .
- $T_{kl}$  مقدار محصول قراضه و انتقال یافته بین مرکز جمع‌آوری  $k$  و مرکز انهدام  $l$ .
- $Z_i$  مقدار ۱ می‌گیرد، اگر تسهیل در محل  $i$  تأسیس گردد و در غیر این صورت، صفر می‌گیرد.
- $W_k$  مقدار ۱ می‌گیرد، اگر مرکز جمع‌آوری در محل  $k$  تأسیس گردد و در غیر این صورت، صفر می‌گیرد.
- $H_l$  مقدار ۱ می‌گیرد، اگر مرکز انهدام در محل  $l$  تأسیس گردد و در غیر این صورت، صفر می‌گیرد.



$$\begin{aligned} \text{Min } z = & \sum_i E_i Z_i + \sum_k F_k W_k + \sum_l G_l H_l + \sum_i \sum_j T_{ij} X_{ij} + \sum_j \sum_k T_{jk} Y_{jk} \\ & + \sum_k \sum_i T_{ki} S_{ki} + \sum_k \sum_l T_{kl} T_{kl}. \end{aligned} \quad (1)$$

S. t.

$$\sum_i X_{ij} \geq \text{Dem}_j, \quad \forall j, \quad (2)$$

$$\sum_i X_{ij} \geq \sum_k Y_{jk}, \quad \forall j, \quad (3)$$

$$\sum_k Y_{jk} = r_j, \quad \forall j, \quad (4)$$

$$\beta \sum_j Y_{jk} = \sum_l T_{kl}, \quad \forall k, \quad (5)$$

$$\sum_j Y_{jk} = \sum_i S_{ki} + \sum_l T_{kl}, \quad \forall k, \quad (6)$$

$$\sum_j X_{ij} + \sum_k S_{ki} \leq Z_i \text{Cap}_i, \quad \forall i, \quad (7)$$

$$\sum_j Y_{jk} \leq W_k \text{Cap}_k, \quad \forall k, \quad (8)$$

$$\sum_k T_{kl} \leq H_l \text{Cap}_l, \quad \forall l, \quad (9)$$

$$Z_i, W_k, H_l \in \{0,1\}, \quad \forall i, k, l, \quad (10)$$

$$X_{ij}, Y_{jk}, S_{ki}, T_{kl} \geq 0, \quad \forall i, j, k, l. \quad (11)$$

عبارت اول در تابع هدف (۱) هزینه‌های ثابت احداث مراکز تولیدی را نشان می‌دهد. عبارات دوم و سوم نیز به ترتیب هزینه‌های ثابت احداث مراکز جمع‌آوری و مراکز انهدام را نشان می‌دهد. عبارت چهارم هزینه حمل و نقل محصولات بین مراکز تولیدی و مناطق مشتری را بیان می‌کند. عبارت پنجم هزینه حمل و نقل محصولات برگشت داده‌شده از مناطق مشتری به مرکز جمع‌آوری را نشان می‌دهد. عبارت ششم هزینه حمل و نقل محصولات قابل استفاده مجدد را بین مراکز جمع‌آوری و مراکز تولیدی نشان می‌دهد و در نهایت عبارت هفتم هزینه حمل و نقل محصولات قراضه را بین مراکز جمع‌آوری و مراکز انهدام نشان می‌دهد. محدودیت (۲) مطمئن می‌سازد که تقاضای همه مشتریان از محصولات برآورده گردد. محدودیت (۳) تضمین می‌کند جریان ورودی به مناطق مشتری از جریان برگشتی بزرگ‌تر می‌باشد. محدودیت (۴) مقدار برگشت محصولات از مشتری را نشان می‌دهد. محدودیت (۵) کسری از محصولات قراضه از هر محصول را نشان می‌دهد. محدودیت (۶) مقدار محصول برگشت داده‌شده از مشتری به مرکز جمع‌آوری برابر با مقدار محصولات قابل بازتولید و قراضه می‌باشد. محدودیت‌های (۷) تا (۹) حداکثر ظرفیت قابل استفاده از مراکز تولیدی، جمع‌آوری و انهدام را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) نوع و جنس متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.

*NP-Hard* بودن مسائل طراحی شبکه زنجیره تامین در بسیاری از تحقیقات اثبات شده است. این مسائل متشکل از دو نوع مسئله مختلف شامل مکان‌یابی تسهیلات و بهینه‌سازی مقدار جریان بین تسهیلات می‌باشد (سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین مدل طراحی شده شبکه زنجیره تامین خود نوعی از مسائل مکان‌یابی تسهیلات نیز می‌باشد. زهل و سلیمانی (۲۰۱۶) اثبات کردند که مسائل مکان‌یابی تسهیلات جزو مسائل *NP-Hard* به شمار می‌آید. در این صورت مدل شبکه زنجیره تامین نیز جزو مسائل *NP-Hard* تلقی می‌گردد و حل این‌گونه مسائل با روش‌های دقیق بسیار زمان‌بر بوده و در سایزهای بزرگ‌تر غیرقابل حل می‌باشد. بنابراین بایستی از الگوریتم‌های فراابتکاری که سرعت جستجوی بالایی برای حل مسائل بهینه‌سازی دارند، استفاده کرد. در این مقاله یک الگوریتم بهینه‌سازی وال با رمزگذاری جدید مبتنی بر اولویت جهت حل مدل شبکه زنجیره تامین حلقه طراحی شده است. دلیل استفاده از این الگوریتم برخلاف سایر الگوریتم‌های رایج و موجود، توانایی بالای جستجوی این الگوریتم بر اساس عملگرهای خود است. همانطور که قبلاً اشاره شد، این الگوریتم توانایی تغییر جواب تصادفی برای رسیدن به جواب بهینه را با دو عملگر مختلف خود امکان‌پذیر می‌سازد. عملگرهای الگوریتم وال برخلاف سایر الگوریتم‌ها به گونه‌ای طراحی شده که توانایی خروج سریع از بهینگی محلی به بهینگی



## ۴- روش حل

### ۴-۱- رمزگذاری جدید مبتنی بر اولویت (جواب اولیه)

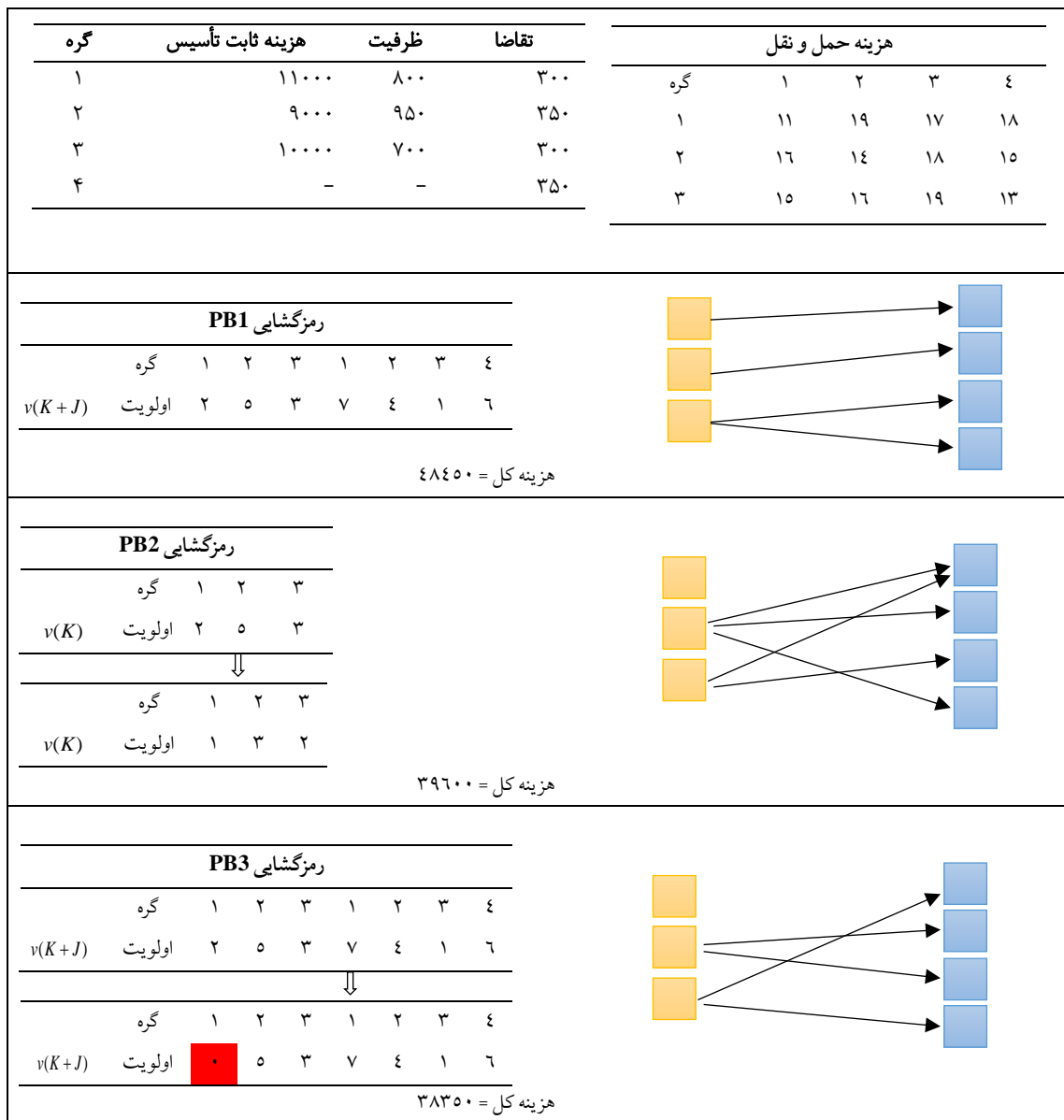
جواب اولیه یکی از مهم ترین موضوعات برای رمزگذاری و رمزگشایی در حل مسائل بهینه سازی هستند که بر روی عملکرد الگوریتم ها تأثیر می گذارد. جواب اولیه بر پایه درخت یکی از راه ها برای رمزگذاری مسائل طراحی شبکه می باشد. در این حوزه چندین راه برای رمزگذاری ارائه شده است، برای مثال ژن و چنگ (۲۰۰۰) سه راه برای رمزگذاری ارائه کردند که شامل رمزگذاری بر پایه کمان، رمزگذاری بر پایه رأس و رمزگذاری بر پایه کمان-رأس می باشد. ژن و چنگ (۲۰۰۰) از جواب اولیه رمزگذاری بر پایه رأس استفاده کردند که برای حل مسائل درخت حمل و نقل استفاده می شد. در این جواب اولیه، راه حل شامل یک رشته به طول  $2 - |K| + |I|$  بود که  $|K|$  نشان دهنده تعداد منابع و  $|I|$  نشان دهنده تعداد دیوها بود. این روش نیز نیازمند یک ماشین جهت اصلاح جواب اولیه بود تا راه حل در فضای موجه مسئله قرار بگیرد. ژن و چنگ (۲۰۰۰) یک رمزگذاری مبتنی بر اولویت برای حل مسائل درخت حمل و نقل توسعه دادند که نیازی به ماشین اصلاح جواب اولیه نبود. در این جواب اولیه، راه حل شامل یک رشته به طول  $|K| + |I|$  بود که  $|K|$  و  $|I|$  به ترتیب تعداد منابع و دیوها را نشان می داد. همچنین این جواب اولیه برای حل مسائل کوتاه ترین مسیر و مسائل زمان بندی پروژه نیز به کار می رود. در این مقاله یک رمزگذاری جدید مبتنی بر اولویت که توسط ژن و چنگ (۲۰۰۰) طراحی شده، استفاده شده است. جواب اولیه ارائه شده در این مقاله علاوه بر حل مسئله درخت حمل و نقل، مکان بهینه تسهیلات بالقوه را نیز به طور هم زمان در نظر می گیرد. برای نشان دادن کارایی راه حل ها برای حل مسئله شبکه زنجیره تامین، شکل (۲) تفاوت بین رمزگذاری های مبتنی بر اولویت توسعه داده شده توسط ژن و همکاران (۲۰۰۶)، جمشیدی و همکاران (۲۰۱۲) و رمزگذاری جدید مبتنی بر اولویت در این مقاله که با (PBI)، (PB2) و (PB3) نشان داده می شود، ارائه شده است. شکل (۲) یک شبکه زنجیره تامین ۲ سطحی با ۳ منبع و ۴ دیو، شامل ظرفیت منابع، تقاضای دیوها، هزینه احداث منابع، هزینه های حمل و نقل بین گره ها و رمزگذاری های مبتنی بر اولویت نشان داده شده است. در جواب اولیه پیشنهاد شده، راه حل شامل یک رشته به طول  $|K| + |I|$  می باشد که اعضای  $|K|$  و  $|I|$  منابع و دیوهای یک شبکه زنجیره تامین را نشان می دهد. بعد از عملیات رمزگذاری، به منظور ساختن ارتباط بین جواب اولیه و شبکه زنجیره تامین، بایستی جواب اولیه در معنای مشخصی رمزگشایی شود تا مقدار متغیرهای تصمیم گیری شامل مقدار بهینه جریان بین تسهیلات و مکان های بهینه تسهیلات بالقوه مشخص گردد. برای رمزگشایی جواب اولیه، ابتدا مکان تسهیلات بالقوه بایستی انتخاب گردد و سپس مقدار بهینه انتقال جریان بین مکان های انتخاب شده تعیین گردد. برای مثال، برای رمزگشایی یک جواب اولیه ارائه شده برای شبکه زنجیره تامین دوسطحی (شکل ۲) بایستی گام های زیر انجام پذیرد:

در اولین بخش از رمزگشایی:

- منبع (۲) با بالاترین اولویت بین گره های منابع انتخاب می شود و سپس ظرفیت منبع (۲) با کل تقاضای دیوها مقایسه می گردد. اگر ظرفیت منبع انتخاب شده کمتر از کل تقاضا باشد ( $950 < 1300$ )، منبع (۳) با بالاترین اولویت بعدی انتخاب می شود. این روش تا جایی ادامه می یابد که مجموع ظرفیت های منابع انتخاب شده از مجموع تقاضای دیوها بیشتر شود. سپس اولویت گره های منابعی که انتخاب نشده اند به صفر کاهش پیدا می کند.

در دومین بخش از رمزگشایی:

- دیو (۱) به منبع (۳) متصل می شود. دیو (۱) بالاترین اولویت در جواب اولیه و منبع (۳) کمترین هزینه حمل و نقل با دیو را دارد.
- مقدار جریان بین گره های انتخاب شده تعیین می گردد که برابر با حداقل مقدار تقاضای دیو و ظرفیت منبع می باشد. برای مثال مقدار بهینه جریان بین گره دیو (۱) و منبع (۳) برابر است با  $X_{31} = \min(700, 300) = 300$ .
- تقاضای دیو و ظرفیت منابع به روزرسانی می شود که برای گره دیو (۱) و منبع (۳) برابر است با  $Cap_3 = 400 - 700 = 300$  و  $Dem_1 = 300 - 300 = 0$ .
- چون تقاضای دیو (۱) به مقدار صفر رسیده است؛ اولویت متناظر با دیو (۱) نیز به صفر کاهش می یابد.



شکل ۲- نمونه ای از شبکه زنجیره تامین دوسطحی و جواب های اولیه ارائه شده.

برای حل مدل شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ۴ سطحی بایستی ۴ جواب اولیه برای هر بخش به صورت جداگانه طراحی شود. بخش اول شامل گره های مناطق مشتری و مراکز جمع آوری، بخش دوم شامل گره های مراکز تولیدی و مناطق مشتری، بخش سوم شامل مراکز جمع آوری و مراکز تولیدی و بخش چهارم شامل مراکز جمع آوری و مراکز انهدام می باشد. برای مثال برای نشان داده جواب اولیه شبکه زنجیره تامین حلقه بسته طراحی شده مطابق با شکل (۴)، ۵ منطقه مشتری، ۲ مرکز جمع آوری، ۳ مرکز تولیدی و دو مرکز انهدام در نظر گرفته شده است.

$K$  مجموعه منابع،  $J$  مجموعه دپوها،  $Dem_j$  تقاضای دپوی  $j$ ،  $Cap_k$  ظرفیت منبع  $k$ ،

ورودی:  $Tr_{kj}$  هزینه حمل و نقل یک واحد محصول بین منبع  $k$  و دپو  $j$ ،

$v(K+J)$  جواب اولیه.

$X_{kj}$  مقدار انتقال محصول بین منبع  $k$  و دپو  $j$ ،

$Y_k$  تأسیس یک منبع در محل  $k$ .

خروجی:

بخش ۱. تا زمانی که  $CapT \geq \sum_{j=1}^K Dem_j$

یک گره را بر اساس  $l = \arg \max \{v(k), k \in K\}$  انتخاب کنید.

بخش ۲.  $CapT = \sum_{l=1}^K Cap_l$

اگر  $CapT < \sum_{j=1}^K Dem_j$  آنگاه  $CapT = \sum_{j=1}^K Dem_j$  و  $Tr_{j(k-l)} = \inf \forall j \in J, k \in K, l \in L$  و  $v(k-l) = 0, k \in K, l \in L$

بخش ۳. تا زمانی که  $v(|k| + j) \neq 0, \forall j \in J$

بخش ۴.  $X_{kj} = 0, \forall j \in J, k \in K$

بخش ۵. یک گره را بر اساس  $l = \arg \max \{v(t), t \in |K| + |J|\}, \forall j \in J, k \in K$  انتخاب کنید.

بخش ۶. اگر  $l \in k$  به عنوان یک منبع انتخاب شده باشد  $k^* = l$

آنگاه یک دپو بر اساس حداقل هزینه بر اساس  $j^* = \arg \min \{Tr_{kj} | v(j) \neq 0\}, j \in J$  انتخاب کنید،

در غیر این صورت اگر  $l \in j$  به عنوان یک دپو انتخاب شده باشد  $j^* = l$

آنگاه یک منبع بر اساس حداقل هزینه بر اساس  $k^* = \arg \min \{Tr_{kj} | v(j) \neq 0\}, k \in K$  انتخاب کنید.

بخش ۷. مقدار جریان بین گره و منبع را تخصیص دهید  $(X_{k^*j^*} = \min(Cap_{k^*}, Dem_{j^*}))$

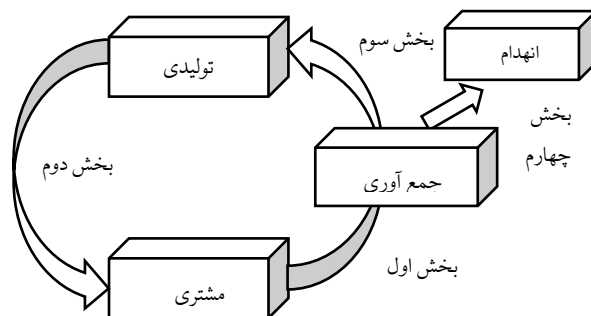
ظرفیت منبع و تقاضای دپو را به روزرسانی کنید  $Cap_{k^*} = Cap_{k^*} - X_{k^*j^*}$  و  $Dem_{j^*} = Dem_{j^*} - X_{k^*j^*}$

بخش ۸. اگر  $Cap_{k^*} = 0$  آنگاه  $v(k^*) = 0$

اگر  $Dem_{j^*} = 0$  آنگاه  $v(j^*) = 0$

بخش اول								
گره	۱	۲	۱	۲	۳	۴	۵	
اولویت	۴	۵	۲	۷	۳	۶	۱	
بخش دوم								
گره	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴	۵
اولویت	۳	۲	۶	۸	۷	۴	۵	۱
بخش سوم								
گره	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴	۵
اولویت	۵	۳	۱	۲	۴	۱	۲	۴
بخش چهارم								
گره	۱	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶
اولویت	۳	۱	۴	۲	۱	۲	۳	۴

شکل ۳- الگوریتم رمزگشایی برای هر بخش از شبکه زنجیره تامین دوسطحی.



شکل ۴- نمایشی از یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ۴ سطحی و جواب اولیه آن.





رمزگشایی دومین بخش از جواب اولیه بایستی بعد از رمزگشایی اولین بخش صورت پذیرد، زیرا تقاضای مشتری از محصول جدید و مقدار محصولات بازتولید از رمزگشایی اولین بخش به دست می‌آید. سپس سومین و چهارمین بخش از جواب اولیه بایستی رمزگشایی شود و مقدار بهینه جریان بین تسهیلات و مکان بهینه مراکز بالقوه مشخص شود.

#### ۴-۲- الگوریتم بهینه سازی وال

نهنگ‌ها موجودات فانتزی می‌باشند و به‌عنوان بزرگ‌ترین پستانداران و اغلب به‌عنوان شکارچیان در نظر گرفته می‌شوند. یکی از بزرگ‌ترین نهنگ‌های بی‌دندان، نهنگ کوهان‌دار می‌باشد که طعمه‌های مورد علاقه‌شان گله کرپل و ماهی کوچک هستند. جالب‌ترین مسئله در مورد نهنگ‌های کوهان‌دار شکار خاص آن‌ها است. این رفتار تغذیه روش تغذیه شبکه حباب نامیده می‌شود که این تغذیه با ایجاد حباب‌های متمایز در طول یک دایره یا مسیری به شکل ۹ انجام می‌شود. باین‌حال؛ گلدبوگن و همکاران (۲۰۱۳) این رفتار را با استفاده از حس‌گرهای برجسب‌گذاری شده مورد بررسی قرار داده‌اند و دو مانور مرتبط با حباب پیدا کردند و آن‌ها را "به سمت بالا-مارپیچی" و "حلقه دویل" نامیده‌اند. در این بخش مدل ریاضی از محاصره طعمه، مانور تغذیه مارپیچی شبکه حباب و جستجو که توسط میرجلیلی و لوپس (۲۰۱۶) ارائه شده است، تشریح می‌گردد.

#### ۴-۲-۱- محاصره طعمه

نهنگ‌های کوهان‌دار می‌توانند محل طعمه را تشخیص داده و آن‌ها را محاصره کنند. الگوریتم WOA فرض می‌کند که در حال حاضر نامزد بهترین راه‌حل، طعمه هدف می‌باشد. این رفتار توسط معادلات زیر نشان داده شده است:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}(t) - \vec{X}(t)|, \quad (12)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}, \quad (13)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a}, \quad (14)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}. \quad (15)$$

در روابط بالا  $t$  تکرار فعلی را نشان می‌دهد،  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  بردار ضرایب هستند،  $X^*$  بردار موقعیت بهترین راه‌حل به دست آمده تاکنون و  $\vec{X}$  بردار موقعیت جسم است.  $\vec{a}$  به صورت خطی از ۲ تا ۰ در طول تکرار کاهش می‌یابد و  $\vec{r}$  یک بردار تصادفی  $[0, 1]$  است.

#### ۴-۲-۲- روش حمله شبکه حباب (فاز بهره‌برداری)

به منظور مدل‌سازی ریاضی رفتار شبکه حباب نهنگ کوهان‌دار، دو روش به شرح زیر طراحی شده است:

- کاهش سازوکار محاصره: این رفتار با کاهش مقدار  $\vec{a}$  در رابطه (۱۴) به دست می‌آید. باید توجه داشت که محدوده نوسان  $\vec{a}$  نیز به  $a$  کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر  $\vec{A}$  یک مقدار تصادفی در بازه  $[-a, a]$  است که در آن  $a$  از مقدار ۲ به ۰ در طول دوره تکرار کاهش می‌یابد.
- موقعیت به‌روزرسانی مارپیچ: معادله مارپیچی بین موقعیت نهنگ و موقعیت طعمه برای تقلید از حرکت مارپیچ شکل نهنگ کوهان‌دار به شرح زیر است:

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}^l \cdot e^{BL} \cdot \text{Cos}(2\pi L) + \vec{X}^*(t). \quad (16)$$

که  $\vec{D}^l = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)|$  است و فاصله نهنگ  $l$  ام به طعمه (بهترین راه‌حل به دست آمده تاکنون) را نشان می‌دهد،  $b$  یک ثابت برای تعریف شکل مارپیچی لگاریتمی است و  $l$  یک عدد تصادفی در بازه  $[-1, 1]$  می‌باشد.

#### ۴-۲-۳- جستجو برای طعمه (فاز اکتشاف)

رویکرد مشابه بر اساس تنوع بردار  $\vec{A}$  می‌تواند برای جستجوی طعمه (اکتشاف) مورد استفاده قرار گیرد. لذا این سازوکار و  $|\vec{A}| < 1$  با تأکید بر اکتشاف و اجازه دادن به الگوریتم WOA باعث انجام یک جستجوی کلی می‌شود. مدل ریاضی به شرح زیر است:



$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X}|, \quad (17)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D}. \quad (18)$$

که در آن  $\vec{X}_{rand}$  یک بردار موقعیت تصادفی (یک نهنگ تصادفی) است که از جمعیت فعلی انتخاب شده است. شایان ذکر است WOA فقط شامل دو پارامتر اصلی داخلی ( $A, C$ ) است که باید تنظیم شود.

### ۳-۴- تبدیل فضای جستجوی پیوسته به فضای جستجوی گسسته

با توجه به اینکه جواب اولیه ارائه شده برای حل مسئله شبکه زنجیره تامین حلقه بسته به صورت جایگشتی از اعداد و به صورت گسسته می باشد، نیاز است تا فضای جستجو به صورت گسسته طراحی گردد. بنابراین با استفاده از مکانیسم زیر می توان فضای جستجوی پیوسته تولید شده توسط الگوریتم WOA را به فضای جستجوی گسسته تبدیل نمود.

- انتخاب خانه کوچک ترین رشته و تخصیص اولویت (1) به آن.
- انتخاب خانه کوچک ترین عدد بعدی و تخصیص اولویت (2) به آن.
- تکرار روش فوق تا زمانی که خانه بزرگ ترین رشته به بالاترین اولویت تبدیل گردد.

شکل ۵- روش تبدیل کروموزوم پیوسته به کروموزوم گسسته.

تعداد گره ها						
۰/۳۲	۰/۵۱	۰/۶۴	۰/۲۵	۰/۱۴	۰/۰۲	اعداد تصادفی
۴	۵	۶	۳	۲	۱	عملگر تبدیل

### ۵- نتایج محاسباتی

در این بخش به منظور بررسی عملکرد الگوریتم WOA با توجه به شاخص های مقدار تابع هدف و زمان محاسباتی، ۲۱ مسئله نمونه در سایزهای مختلف (جدول ۱) طراحی و نتایج به دست آمده از آن ها در این بخش نشان داده شده است.

جدول ۱- اندازه و سایز مسائل نمونه.

سایز کوچک	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
تولیدی	۳	۴	۵	۷	۸	۱۰	۱۲
جمع آوری	۲	۳	۴	۵	۶	۸	۸
انهدام	۲	۳	۳	۴	۵	۷	۷
مشتری	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰
سایز متوسط	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
تولیدی	۱۵	۱۸	۲۱	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰
جمع آوری	۹	۱۰	۱۲	۱۵	۲۰	۲۵	۳۲
انهدام	۸	۹	۱۰	۱۲	۱۵	۱۸	۲۰
مشتری	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
سایز بزرگ	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱
تولیدی	۴۵	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
جمع آوری	۳۷	۴۲	۴۸	۵۳	۵۷	۶۰	۶۵
انهدام	۲۴	۲۹	۳۳	۳۸	۴۲	۴۵	۵۰
مشتری	۱۰۰	۱۲۰	۱۴۰	۱۶۰	۱۸۰	۲۰۰	۲۲۰



پارامتر	بازه
$E_i, F_k, G_l$	$\sim U(1000000, 1200000)$
$Dem_j$	$\sim U(100, 150)$
$r_j$	$\sim U(10, 50)$
$\beta$	$\sim U(0.6, 0.8)$
$Tjk_{jk}, Tki_{ki}, Tkl_{kl}, Tij_{ij}$	$\sim U(20, 30)$
$Capi_i$	$\sim U(800, 1200)$
$Capk_k$	$\sim U(200, 400)$
$Capl_l$	$\sim U(100, 300)$

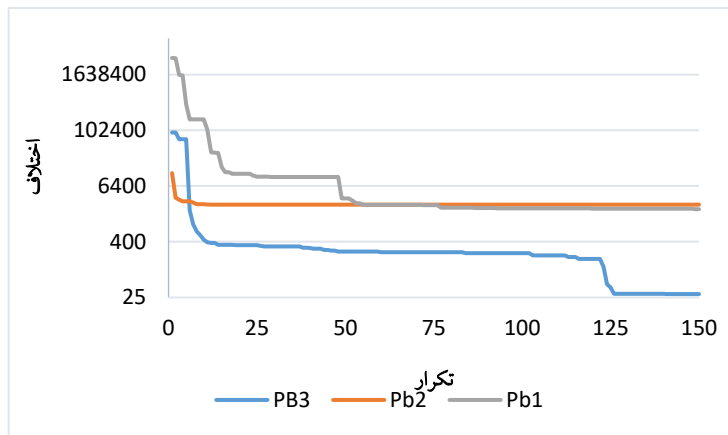
نتایج به دست آمده از حل مسائل نمونه از روش  $PB3$  با نتایج به دست آمده از حل روش دقیق ( $GAMS$ ) و روش های  $PB1$  و  $PB2$  در ادامه نشان داده شده است. به دلیل اینکه روش دقیق ( $GAMS$ ) تنها قادر به حل مسائل سایز کوچک و متوسط می باشد، برای تعیین کارایی روش های حل از اختلاف بین نتایج هر روش و  $GAMS$  استفاده شده است. جدول ۳ میانگین نتایج هر مسئله نمونه در سایز کوچک و متوسط با روش های حل نشان می دهد.

جدول ۳- میانگین مقادیر توابع هدف مسائل نمونه در سایز کوچک و متوسط.

مسائل نمونه	Gams	PB1	PB2	PB3
۱	۵۲۱۶۱۳۱	۵۲۱۶۲۵۸	۵۲۱۶۸۷۸	۵۲۱۶۱۳۱
۲	۶۵۳۷۳۶۷	۶۵۳۷۶۰۵	۶۵۳۸۱۳۱	۶۵۳۷۳۶۷
۳	۷۷۰۹۱۷۷	۷۷۰۹۶۳۴	۷۷۱۰۵۲۳	۷۷۰۹۱۷۷
۴	۹۳۷۸۱۰۳	۹۳۷۸۷۵۲	۹۳۷۹۰۲۵	۹۳۷۸۱۰۳
۵	۱۱۶۱۱۱۷۰	۱۱۶۱۲۱۱۹	۱۱۶۱۲۶۳۷	۱۱۶۱۱۱۷۲
۶	۱۲۲۱۷۲۹۴	۱۲۲۱۹۲۳۲	۱۲۲۱۸۸۲۸	۱۲۲۱۷۲۹۶
۷	۱۴۵۴۶۲۲۴	۱۴۵۴۷۴۵۱	۱۴۵۴۷۶۹۴	۱۴۵۴۶۲۲۷
۸	۱۵۶۴۲۷۰۰	۱۵۶۴۵۳۹۷	۱۵۶۴۴۴۱۰	۱۵۶۴۲۷۰۵
۹	۱۶۳۹۴۹۸۶	۱۶۴۱۱۸۸۶	۱۶۴۰۸۶۵۰	۱۶۳۹۵۰۱۰
۱۰	۱۸۱۹۲۳۴۸	۱۸۲۰۹۱۹۶	۱۸۱۹۹۰۱۲	۱۸۱۹۲۳۹۷
۱۱	۱۹۶۱۳۰۸۶	۱۹۸۰۰۹۵۱	۱۹۶۲۸۸۶۳	۱۹۶۱۳۱۵۳
۱۲	۲۲۹۸۴۰۰۰	۲۳۶۹۳۹۶۹	۲۳۴۸۵۲۲۱	۲۲۹۸۴۵۴۰
۱۳	۲۵۱۶۴۸۵۱	۲۶۲۱۲۶۶۸	۲۶۱۳۹۳۸۲	۲۵۱۶۵۴۴۲
۱۴	۳۲۱۵۶۸۹۸	۳۴۰۱۳۵۳۰	۳۳۵۱۱۵۶۴	۳۲۱۵۷۶۵۹

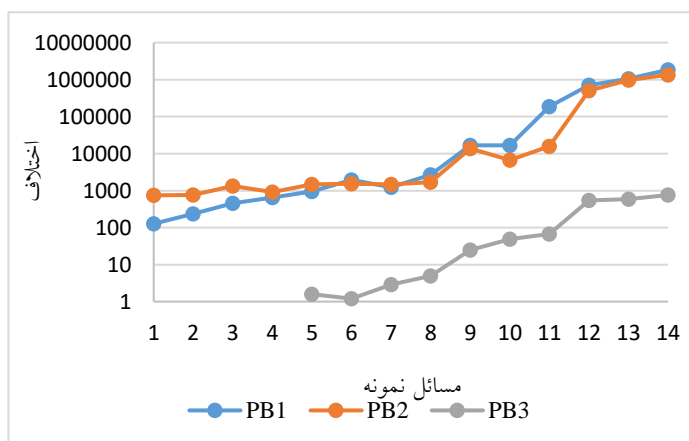
طبق خروجی های جدول ۳، مشاهده می شود که نتایج به دست آمده از روش  $PB3$  بسیار نزدیک به روش دقیق ( $GAMS$ ) می باشد. اختلاف مابین نتایج میانگین های توابع هدف روش های حل و ( $GAMS$ ) در نمودار شکل (۶) نشان داده شده است. مطابق با این شکل نتایج روش حل  $PB3$  در حل مسائل نمونه ۱ تا ۴ برابر با نتایج به دست آمده از روش حل دقیق ( $GAMS$ ) می باشد. با این حال میانگین های توابع هدف روش های حل  $PB3$  و روش های حل  $PB1$  و  $PB2$  در مسائل نمونه سایزهای متوسط و کوچک نیز با یکدیگر اختلاف بسیار زیادی دارند. این اختلاف در مسئله نمونه ۱۴، برابر با  $760/9$  واحد برای  $PB3$ ،  $1856631/6$  واحد برای  $PB1$  و  $1354665/6$  واحد برای  $PB2$  می باشد.





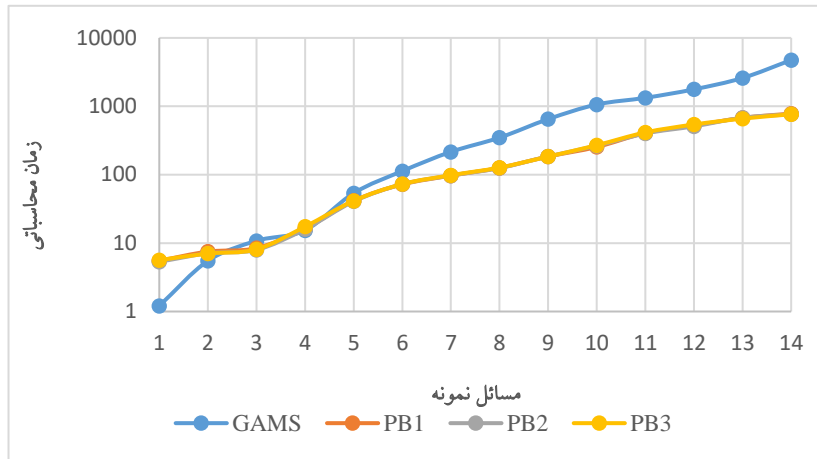
شکل ۶- میانگین اختلاف بین روش های حل در مسائل نمونه مختلف (سایز کوچک و متوسط).

شکل (۷) اختلاف بین نتایج حاصل از روش های حل را در تکرارهای مختلف الگوریتم بهینه سازی وال نشان می دهد. مطابق با این شکل به روشنی دیده می شود که روش حل  $PB3$  توانایی جستجوی بیشتری از فضای حل را دارد که این امر منجر به رسیدن به جواب های نزدیک به بهینه می گردد.



شکل ۷- اختلاف بین روش های حل برای مسئله نمونه ۱۲ در تکرارهای مختلف.

به دلیل  $NP-Hard$  بودن مسئله طراحی شده، زمان محاسباتی می تواند به عنوان یکی دیگر از شاخص های ارزیابی روش های حل در نظر گرفته شود. برای نشان دادن این موضوع، میانگین زمان محاسباتی از روش های حل برای هر مسئله نمونه در سایزهای کوچک و متوسط در نمودار شکل (۸) نشان داده شده است. مطابق با نمودار شکل (۸)، مشاهده می شود که زمان محاسباتی به دست آمده از روش حل دقیق با افزایش اندازه مسئله به صورت نمایی افزایش یافته است. همچنین زمان محاسباتی روش حل دقیق از مسئله نمونه ۳ به بعد بیشتر از زمان محاسباتی روش های حل دیگر به دست آمده است.



شکل ۸- میانگین زمان محاسباتی روش‌های حل در هر مسئله نمونه (سایز کوچک و متوسط).

به‌طورکلی، مشاهدات نشان می‌دهد که نتایج به‌دست‌آمده از روش حل پیشنهادی بسیار نزدیک به روش حل دقیق می‌باشد. با این حال زمان محاسباتی روش حل پیشنهادی کمتر از زمان محاسباتی روش حل دقیق در مسائل نمونه سایز کوچک و متوسط کسب‌شده است. برای ارزیابی کارایی روش حل پیشنهادی در سایزهای بزرگ‌تر، ۷ مسئله نمونه طراحی و با روش‌های حل *PB1*، *PB2* و *PB3* اجرا شده‌اند. از سوی دیگر به دلیل عدم کارایی روش حل دقیق (*GAMS*) دریافتن جواب‌های بهینه در سایز بزرگ، مقایسات روش‌های حل بر اساس نتایج *RPD* به‌دست‌آمده انجام خواهد شد.

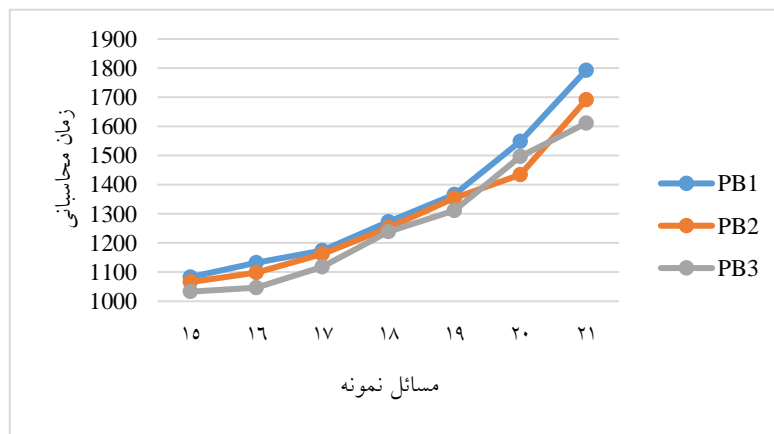
$$\%RPD = \frac{Sol_{روش\ حل} - bestSol_{روش\ حل}}{bestSol_{روش\ حل}} \times 100.$$

که روش حل *Sol* نتیجه به‌دست‌آمده از روش حل، روش حل *bestSol* بهترین نتیجه به‌دست‌آمده از هر روش حل می‌باشد. جدول ۴ میانگین نتایج به‌دست‌آمده از هر روش حل در سایز بزرگ را نشان می‌دهد.

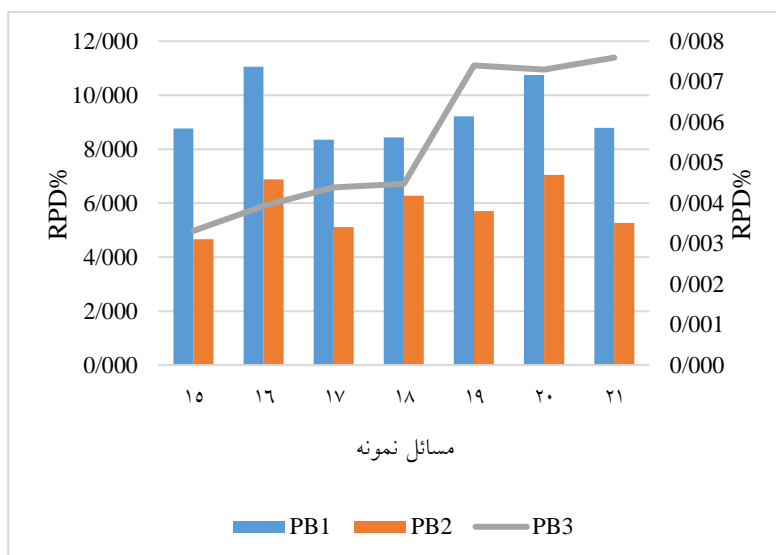
جدول ۴- میانگین توابع هدف هر مسئله نمونه (سایز بزرگ).

مسائل	PB3	PB2	PB1
۱۵	۳۳۹۳۸۷۶۰٫۴۸	۳۵۵۱۸۸۹۳	۳۶۹۱۳۹۳۵٫۰
۱۶	۳۶۸۰۰۰۶۹٫۸۴	۳۹۳۳۰۳۹۲٫۰	۴۰۸۶۵۸۱۳٫۸
۱۷	۴۲۲۳۸۲۱۰٫۳۱	۴۴۳۹۷۰۳۴٫۲	۴۵۷۶۱۵۷۷٫۵
۱۸	۴۶۰۴۵۲۰۰٫۰۹	۴۸۹۳۳۶۸۳٫۰	۴۹۹۲۶۰۹۶٫۰۰
۱۹	۵۳۴۲۰۹۰۵٫۷۳	۵۶۴۶۳۴۹۹٫۹	۵۸۳۳۶۸۹۳٫۱
۲۰	۵۸۳۰۸۱۴۶٫۳۲	۶۲۴۱۰۵۶۰٫۰	۶۴۵۶۸۴۰۲٫۴۵
۲۱	۶۴۱۳۷۵۹۱٫۲۷	۶۷۵۱۲۱۱۸٫۸	۶۹۷۶۵۵۹۳٫۸۶

اشکال (۹) و (۱۰) به ترتیب میانگین زمان محاسباتی و میانگین *RPD* به‌دست‌آمده از روش‌های حل را نشان می‌دهد.



شکل ۹- میانگین زمان محاسباتی به‌دست‌آمده از روش‌های حل در مسائل نمونه سایز بزرگ.



شکل ۱۰- میانگین RPD به دست آمده از روش های حل در مسائل نمونه سایز بزرگ.

مطابق با نتایج شکل (۹) و (۱۰) میانگین زمان محاسباتی و RPD روش PB3 نسبت به روش های PB1 و PB2 کمتر می باشد که نشان از کارایی بالای این روش در حل مسائل سایز بزرگ تر است. همچنین برای مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل مسائل سایز کوچک، متوسط و بزرگ با الگوریتم بهینه سازی وال، الگوریتم های ژنتیک و بهینه سازی ازدحام ذرات نیز مورد مقایسه قرار گرفته است که نتایج حاصله در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- مقایسه نتایج بدست آمده از الگوریتم بهینه سازی وال با الگوریتم های ژنتیک و بهینه سازی ازدحام ذرات.

اندازه مسائل	مسئله نمونه	الگوریتم بهینه سازی وال	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات
	۱	۵۲۱۶۱۳۱٫۵	۵۲۱۸۵۵۷٫۲	۵۲۲۰۲۱۶٫۰
	۲	۶۵۳۷۳۶۷٫۲	۶۵۴۰۶۳۲٫۵	۶۵۴۰۳۱۸٫۵
	۳	۷۷۰۹۱۷۷٫۸	۷۷۱۳۹۲۵٫۱	۷۷۱۴۰۲۸٫۵
	۴	۹۳۷۸۱۰۳٫۶	۹۳۸۲۴۸۰٫۲	۹۳۸۰۲۰۶٫۹
	۵	۱۱۶۱۱۱۷۲	۱۱۶۱۶۰۵	۱۱۶۱۴۴۸۸
	۶	۱۲۲۱۷۲۹۶	۱۲۲۲۱۲۶۳	۱۲۲۲۰۴۴۰
	۷	۱۴۵۴۶۲۲۷٫۶	۱۴۵۴۸۳۳۴	۱۴۵۵۰۵۲۴
	۸	۱۵۶۴۲۷۰۵٫۳	۱۵۶۴۷۲۵۲	۱۵۶۴۷۰۹۰
	۹	۱۶۳۹۵۰۱۰٫۸	۱۶۳۹۹۸۱۲	۱۶۳۹۷۵۷۱
	۱۰	۱۸۱۹۲۳۹۷٫۳	۱۸۱۹۶۴۳۳	۱۸۱۹۵۸۶۶
	۱۱	۱۹۶۱۳۱۵۳٫۸	۱۹۶۱۷۴۲۷	۱۹۶۱۶۴۹۰
	۱۲	۲۲۹۸۴۵۴۰٫۷	۲۲۹۸۸۱۷۷۰	۲۲۹۸۸۴۷۹
	۱۳	۲۵۱۶۵۴۴۲٫۰	۲۵۱۶۸۶۱۸	۲۵۱۶۹۵۷۰
	۱۴	۳۲۱۵۷۶۵۹٫۶	۳۲۱۶۱۶۲۶	۳۲۱۶۱۹۲۳
	۱۵	۳۳۹۳۸۷۶۰٫۴	۳۳۹۴۱۲۷۴	۳۳۹۴۱۵۸۸
	۱۶	۳۶۸۰۰۰۶۹٫۸	۳۶۸۰۴۱۸۷	۳۶۸۰۴۱۰۸
	۱۷	۴۲۲۳۸۲۱۰٫۳	۴۲۲۴۰۳۰۵	۴۲۲۴۲۱۷۵
	۱۸	۴۶۰۴۵۲۰۰٫۰	۴۶۰۴۸۰۳۰	۴۶۰۴۷۶۸۷
	۱۹	۵۳۴۲۰۹۰۵٫۷	۵۳۴۲۳۰۴۴	۵۳۴۲۳۲۶۲
	۲۰	۵۸۳۰۸۱۴۶٫۳	۵۸۳۱۰۴۳۷	۵۸۳۱۱۶۴۱
	۲۱	۶۴۱۳۷۵۹۱٫۲	۶۴۱۴۲۰۶۱	۶۴۱۴۲۴۷۰

برای مقایسه بهتر نتایج جدول ۵، شکل (۱۱) نمودار میله ای اختلاف میانگین های کل مسائل نمونه را در سه سایز کوچک، متوسط و بزرگ برای الگوریتم های ژنتیک و بهینه سازی ازدحام ذرات از الگوریتم بهینه سازی وال نشان می دهد.



شکل ۱۱- اختلاف نتایج حاصل از محاسبات بین میانگین های کل مسائل نمونه.

با توجه به نتایج شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که هر دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات، ناکارآمدتر از الگوریتم بهینه‌سازی وال عمل کرده‌اند، در حالی که بین این دو الگوریتم نیز الگوریتم ژنتیک نتایج قابل قبولی نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در مسائل نمونه سایز بزرگ کسب نموده است. در نهایت جدول (۶) و (۷) به ترتیب آزمون ناپارامتریک ویلکاکسون را در مقایسه میانگین مقدار تابع هدف و زمان محاسباتی مسائل نمونه سایز کوچک، متوسط و بزرگ نشان می‌دهد.

جدول ۶- آزمون ناپارامتریک ویلکاکسون برای مقایسه میانگین مقدار تابع هدف.

سایز	PB2 با PB3	PB1 با PB3	PB1 با PB2
Z	-۲,۳۶۶	-۲,۳۶۶	-۱,۸۵۹
معناداری	۰,۰۱۸	۰,۰۱۸	۰,۰۶۳
Z	-۲,۳۶۶	-۲,۳۶۶	-۲,۳۶۶
معناداری	۰,۰۱۸	۰,۰۱۸	۰,۰۱۸
Z	-۲,۳۶۶	-۲,۳۶۶	-۲,۳۶۶
معناداری	۰,۰۱۸	۰,۰۱۸	۰,۰۱۸

سایز	PB2 با PB3	PB1 با PB3	PB1 با PB2
Z	-۲/۱۹۷	-۱/۰۱۴	-۰/۵۰۷
معناداری	۰/۰۲۸	۰/۳۱۰	۰/۶۱۲
Z	-۰/۸۴۷	-۰/۲۱۰	-۰/۷۶۲
معناداری	۰/۳۹۷	۰/۸۳۳	۰/۴۴۶
Z	-۱/۳۵۲	-۲/۳۶۶	-۲/۳۷۱
معناداری	۰/۱۷۶	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸



با استفاده از آزمون ناپارامتریک ویلکاکسون میانگین شاخص مقدار تابع هدف و زمان برای روش‌های حل  $PB1$ ،  $PB2$  و  $PB3$  در سه سایز کوچک، متوسط و بزرگ مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل در سطح اطمینان ۹۵٪ نشان می‌دهد که میانگین شاخص مقدار تابع هدف روش پیشنهادی ( $PB3$ )، اختلاف معناداری با روش‌های  $PB1$  و  $PB2$  دارد. همچنین میانگین شاخص زمانی روش  $PB3$  اختلاف معناداری در سایز کوچک با روش  $PB2$  و در سایز بزرگ با  $PB1$  دارد.

## ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این مقاله، یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با سطوح مراکز تولیدی به مناطق مشتری، مناطق مشتری به مراکز جمع‌آوری، مراکز جمع‌آوری به مراکز تولیدی و مراکز جمع‌آوری به مراکز انهدام در نظر گرفته شده است. هدف اصلی این مقاله در بعد مدل‌سازی، طراحی یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با هدف یافتن تعداد و مکان بهینه تسهیلات بالقوه و همچنین تعیین مقدار بهینه جریان بین تسهیلات می‌باشد. با توجه به پیچیدگی مسائل شبکه زنجیره تامین و همچنین  $NP-Hard$  بودن مسئله، از یک الگوریتم جمعیت-محور به نام الگوریتم بهینه‌سازی وال با رمزگذاری جدید مبتنی بر اولویت به‌عنوان نوآوری پژوهش استفاده شده است. عدم دسترسی به داده‌های واقعی از محدودیت‌های تحقیق است، برای غلبه بر این محدودیت از داده‌های تصادفی بر اساس توزیع یکنواخت استفاده و ۲۱ مسئله نمونه در سه سایز کوچک، متوسط و بزرگ برای ارزیابی روش‌های حل طراحی شد. مدل طراحی شده در سایزهای کوچک و متوسط توسط نرم‌افزار  $GAMS$  و سه روش پیشنهادی  $PB1$ ،  $PB2$  و  $PB3$  با الگوریتم بهینه‌سازی وال حل و نتایج حاصل نشان داد؛ روش حل  $PB3$  توانایی جستجوی بیشتری از فضای حل را دارد که این امر منجر به رسیدن به جواب‌های نزدیک به بهینه شده است. همچنین به دلیل محدودیت‌های حداکثر زمان محاسباتی و حداکثر تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری ورودی برای نرم‌افزار  $GAMS$ ، این نرم‌افزار توانایی حل مسئله در سایز بزرگ‌تر را نداشت؛ که برای حل مسئله در سایزهای بزرگ‌تر تنها از سه روش  $PB1$ ،  $PB2$  و  $PB3$  استفاده شد. با انجام محاسبات آماری و همچنین شاخص‌های زمان محاسباتی و مقدار تابع هدف، مشخص شد که کارایی روش رمزگذاری مبتنی بر اولویت ( $PB3$ )، نسبت به روش‌های  $PB1$  و  $PB2$  در حل مسئله شبکه زنجیره تامین حلقه بسته بیشتر است. لذا برای حل مسائل شبکه زنجیره تامین حلقه بسته استفاده از این روش با الگوریتم بهینه‌سازی وال پیشنهاد می‌گردد. برای تحقیقات آینده پیشنهادات زیر برای بهبود مقاله انجام شده داده می‌شود:

- پیاده‌سازی مدل شبکه زنجیره تامین طراحی شده بر روی یک مورد مطالعه واقعی
- غیرقطعی در نظر گرفتن پارامتر تقاضا و همچنین هزینه‌های موجود به دلیل متغیر بودن این پارامترها
- در نظر گرفتن چند تابع هدف نظیر (کاهش میزان انتشار گاز گلخانه‌ای، کاهش ریسک حمل و نقل و ...)





رحیمی، ا؛ حسین زاده سلجوقی، ف. (۱۳۹۶). مدل برنامه‌ریزی چندهدفه برای تعیین کارایی و بازده به مقیاس زنجیره تامین دومرحله‌ای (مطالعه موردی: شرکت‌های رزین ایران). *تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات*, ۲(۳), ص ۲۲۷-۲۱۳.

محمودی، ا؛ مجیبیان، ف؛ نوری ثابت، الف. (۱۳۹۸). ارائه یک مدل ریاضی جهت انتخاب تامین کننده در زنجیره تامین با در نظرگیری مسائل کنترل موجودی و قیمت گذاری. *تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات*, ۴(۳), ص ۲۳۱-۲۲۱.

- Achillas, C., Vlachokostas, C., Aidonis, D., Moussiopoulos, N, Iakovou, E., & Banias, G. (2010). Optimising reverse logistics network to support policy-making in the case of electrical and electronic equipment. *Waste Management*, 30(12), 2592-2600.
- Ahmadzadeh, E., & Vahdani, B. (2017). A location-inventory-pricing model in a closed loop supply chain network with correlated demands and shortages under a periodic review system. *Computers & chemical engineering*, 101, 148-166.
- Chen, X., Chuluunsukh, A., Yun, Y., & Gen, M. (2018, August). Optimization of closed-loop supply chain model using hybrid genetic algorithm approach for tire industry in Korea. In *International conference on management science and engineering management* (pp. 1593-1612). Springer, Cham.
- 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.
- Eskandarpour, M., Zegordi, S. H., & Nikbakhsh, E. (2013). A parallel variable neighborhood search for the multi-objective sustainable post-sales network design problem. *International journal of production economics*, 145(1), 117-131.
- Gen, M., Altıparmak, F., & Lin, L. (2006). A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding. *OR spectrum*, 28(3), 337-354.
- Gen, M., & Cheng, R. (1996). *Genetic Algorithms and Manufacturing Systems Design*. John Wiley & Sons, Inc.
- Ghahremani-Nahr, J., Kian, R., & Sabet, E. (2019). A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm. *Expert systems with applications*, 116, 454-471.
- Ghahremani Nahr, J., Kian, R., & Rezazadeh, H. (2018). A modified priority-based encoding for design of a closed-loop supply chain network using a discrete league championship algorithm. *Mathematical problems in engineering*, 2018.
- Goldbogen, J. A., Friedlaender, A. S., Calambokidis, J., Mckenna, M. F., Simon, M., & Nowacek, D. P. (2013). Integrative approaches to the study of baleen whale diving behavior, feeding performance, and foraging ecology. *Bioscience*, 63(2), 90-100.
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European journal of operational research*, 240(3), 603-626.
- Jamshidi, R., Ghomi, S. F., & Karimi, B. (2012). Multi-objective green supply chain optimization with a new hybrid memetic algorithm using the Taguchi method. *Scientia iranica*, 19(6), 1876-1886.
- Lee, J. E., Gen, M., & Rhee, K. G. (2009). Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. *Computers & industrial engineering*, 56(3), 951-964.
- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, 95, 51-67.
- Mousazadeh, M., Torabi, S. A., & Zahiri, B. (2015). A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design. *Computers & chemical engineering*, 82, 115-128.
- Nobil, A. H., & Taleizadeh, A. A. (2016). Analysing a fuzzy integrated inventory-production-distribution planning problem with maximum NPV of cash flows in a closed-loop supply chain. *International journal of inventory research*, 3(1), 31-48.
- Pasandideh, S. H. R., & Asadi, K. (2016). A priority-based modified encoding-decoding procedure for the design of a bi-objective SC network using meta-heuristic algorithms. *International journal of management science and engineering management*, 11(1), 8-21.
- Rad, R. S., & Nahavandi, N. (2018). A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount. *Journal of cleaner production*, 196, 1549-1565.
- Soleimani, H., Govindan, K., Saghafi, H., & Jafari, H. (2017). Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. *Computers & industrial engineering*, 109, 191-203.
- Zandieh, M., & Chensebli, A. (2016). Reverse logistics network design: a water flow-like algorithm approach. *opsearch*, 53(4), 667-692.
- Zohal, M., & Soleimani, H. (2016). Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: a case study in gold industry. *Journal of cleaner production*, 133, 314-337.