

## ارائه مدل تصادفی مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی فسادپذیر با در نظر گرفتن کمبود و زمان حمل

سیما حاجیان<sup>1</sup>، محمد علی افشارکاظمی<sup>2\*</sup>، سید محمد سیدحسینی<sup>3</sup>، عباس طلوعی اشلقی<sup>4</sup>

- 1- دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
- 2- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
- 3- استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
- 4- استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

پذیرش: 1399/2/25

دریافت: 1398/8/20

### چکیده

با آشکارتر شدن اهمیت مدیریت زنجیره تأمین نزد صاحبان صنعت، نقش هماهنگی و یکپارچگی مؤلفه‌های مختلف زنجیره تأمین در ایجاد مزیت رقابتی، پررنگ‌تر شده است. این مقاله یک مدل ریاضی جامع برای مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی محصولات فاسدشدنی را با در نظر گرفتن کمبود، زمان حمل و ملاحظه‌های زیست‌محیطی در شرایط عدم قطعیت ارائه می‌دهد. به این منظور، یک روش حل دقیق از راه فرموله کردن مسئله به صورت برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط با استفاده از رویکرد تصادفی مبتنی بر سناریو ارائه شده است که هم‌زمان مجموع هزینه‌های سیستم (هزینه مکان‌یابی مراکز با سطح ظرفیت معین، هزینه عملیاتی مراکز، هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری موجودی و یا کمبود مرکز ترکیبی تولید/بازرسی)، مجموع حداکثر زمان در زنجیره و انتشار آلاینده‌ها در کل شبکه را کمینه می‌کند. به دلیل NP-hard بودن مسئله، برای حل آن رویکردی از الگوریتم

E-mail: [M\\_afsharkazemi@iauec.ac.ir](mailto:M_afsharkazemi@iauec.ac.ir)

\* نویسنده مسئول مقاله:



ژنتیک پیشنهاد شده است. به منظور اعتبارسنجی، نتایج الگوریتم پیشنهادی در مثال‌های اندازه کوچک با نتایج حل روش دقیق مقایسه شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده توانایی الگوریتم پیشنهادی در رسیدن به جوابی با درصد اختلاف قابل قبول در زمانی بسیار کمتر نسبت به روش حل دقیق می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم براساس شاخص‌های استاندارد بررسی شده است. نتایج محاسباتی، کارایی مدل ارائه‌شده و روش حل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی، برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه، فاسدشدنی، الگوریتم ژنتیک.

## 1- مقدمه

امروزه مدیریت کارای فعالیت‌های لجستیکی به عنوان یک منبع مهم خلق مزیت رقابتی برای سازمان‌ها محسوب می‌شود چون می‌تواند موجب رضایت مشتریان و پاسخگوی نیاز خاص آنها در کوتاه‌ترین زمان با کمترین هزینه و کیفیتی بالا باشد [1]. سیاست‌های بازگشتی، ملاحظه‌های زیست‌محیطی، تأکید در زمینه خدمات و استفاده دوباره از قطعه‌ها منجر به گسترش زنجیره تأمین سنتی رو به جلو با ترکیب اجزای لجستیک معکوس شده است که مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته را مطرح می‌کند [2-3]. این رویکرد، طراحی شبکه‌های مستقیم و معکوس را به طور هم‌زمان بهینه کرده و از زیربهینگی ناشی از طراحی مجزای شبکه‌ها جلوگیری می‌کند [4]. تصمیم‌گیری‌های مرتبط با موضوع‌ها و چالش‌های شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته به سه دسته کلی استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی تقسیم‌بندی می‌شوند [5] که علاوه بر نیاز به طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته، یکپارچگی این تصمیم‌ها در طراحی زنجیره تأمین به یکی از مهم‌ترین جنبه‌های سیستم مدیریت زنجیره تأمین تبدیل شده است [6]. این مفهوم به بررسی وابستگی میان مکان تسهیلات، تخصیص تأمین‌کنندگان و مشتریان به تسهیلات، ساختار نظام حمل‌ونقل، مسیریابی آنها و نظام کنترل موجودی می‌پردازد. مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی<sup>1</sup> ازجمله مسائل پرکاربرد در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین برای بهبود و کاهش

1. Location-Routing-Inventory Problem



هزینه‌ها و افزایش توان رقابتی می‌باشد [7]. اینکه محصول از کدام مسیر و به وسیله چه مکانی برای انتقال به مقصد انتخاب شود و اینکه چه مقداری از محصول نگهداری شود، برای کاهش هزینه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است تا به این وسیله، کوتاه‌ترین و کم هزینه‌ترین مسیر و کمترین مقدار نگهداری موجودی برای ارسال و دریافت به موقع محصولات به دست آید. این مسأله در زنجیره تأمین کالاهای فسادپذیر به علت شرایط خاص محصول از اهمیت ویژه‌تری برخوردار است، زیرا علاوه بر هزینه ازدست‌رفتن فروش به علت تأمین‌نشدن به موقع تقاضا، هزینه‌های ناشی از نگهداری محصول، افت کیفیت و فاسدشدن محصول را نیز متحمل خواهد شد [8]. بنابراین مکان تسهیلات، فاصله بین آنها و سیستم حمل‌ونقل اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. انتخاب نامناسب برای مراکز توزیع باعث ایجاد مشکلاتی در مسیریابی وسایل نقلیه، حمل‌ونقل و همچنین حجم کار نامتعادل مراکز توزیع می‌شود. باتوجه به اینکه هزینه‌های موجودی به‌طور غیرقابل انکاری ارتباط مستقیم با موقعیت و محل قرارگیری تسهیلات دارند، انتخاب نامناسب مکان تسهیلات موجب افزایش هزینه‌های موجودی می‌شود. زمان تحویل کالا هم که به دلیل دوره عمر کوتاه این کالاها مهم‌ترین فاکتور در فرایند توزیع است، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین زمان انجام سفارش به عوامل مختلفی مانند حالت حمل‌ونقل وابسته است. حالت‌های مختلف حمل‌ونقل شامل یک ارتباط معکوس بین هزینه و زمان هستند. به‌طور یقین هرچه مقدار آن برای کالا کمتر باشد، ارزش افزوده محسوب می‌شود که با دستیابی به آن می‌توان سود رقابتی بلندمدت و کوتاه‌مدت را در بازار به دست آورد.

در واقع درنظرگرفتن تصمیم‌های مربوط به احداث، تخصیص، مسیریابی و مدیریت موجودی به صورت جداگانه، منجر به زیربیهنگی می‌شود، درحالی‌که ادغام‌سازی این تصمیم‌ها در طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته می‌تواند کمک به‌سزایی به مدیریت یکپارچه زنجیره تأمین، کاهش هزینه‌ها، افزایش پاسخگویی و سطح خدمت به مشتریان کرده باشد [9].

با افزایش قوانین، مقررات دولتی و بالارفتن سطح آگاهی عمومی نسبت به اهمیت مسائل محافظت از محیط‌زیست، توجه به زنجیره تأمین سبز بیش از گذشته موردتوجه سازمان‌ها قرار گرفته است [10]. درواقع توجه به جنبه‌های سبز در شبکه‌های زنجیره تأمین و مدیریت شبکه با درنظرگرفتن عوامل زیست‌محیطی مثل کاهش اثرهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، برای توسعه



رقابت شرکت‌هاست. امروزه شرکت‌ها اگر از مدیریت زنجیره تأمین سبز استفاده کنند، علاوه بر حل مشکلات محیط زیستی به پیروزی نسبی در مزیت رقابتی نیز دست پیدا می‌کنند [11]. در این پژوهش، تلاش بر این است که با استفاده از مدل پیشنهادی، امکان ایجاد چارچوب مناسبی برای طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه‌بسته کالاهای فسادپذیر در شرایط عدم قطعیت فراهم شود که در آن تصمیم‌های مربوط به مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی نیز به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند.

## 2- پیشینه پژوهش

### 2-1- مسأله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی

از جمله مطالعات انجام گرفته در زمینه بالا به شرح زیر است:

شکل‌گیری مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در مسائل زنجیره تأمین احتمالی به احمدی جاوید و همکاران (2010) برمی‌گردد. تقاضای آنها غیرقطعی بوده و از توزیع معمولی پیروی می‌کند. هر مرکز توزیع مقداری موجودی اطمینان نگهداری می‌کند. همچنین ناوگان حمل‌ونقل همگن در نظر گرفته شده است. آنها علاوه بر روش دقیق، یک الگوریتم ابتکاری تلفیقی از شبیه‌سازی تبرید و جستجوی ممنوع نیز برای حل مسئله ارائه کردند که برای اندازه‌های مختلف کارایی دارد [12]. سجادی و چراغی (2011) یک شبکه توزیع چند محصولی و با سه سطح شامل کارخانه‌ها، انبارها و مشتریان را با هدف کاهش هزینه‌ها بررسی کردند. در این الگو تقاضای مشتریان احتمالی است و انبارها ظرفیت دارند. همچنین فرض شده است که شرکت‌های لجستیک شخص ثالث در صورت نیاز فضای اضافی برای انبار ارائه می‌دهند. همچنین برای حل مدل از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است [13]. نکودیرلی و همکاران (2014) یک مدل چندهدفه مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی با فرض چند دوره‌ای و چند محصولی پیشنهاد دادند. در مدل آنها، زمان سفر و تقاضای مشتریان غیرقطعی در نظر گرفته شده است. هر انبار براساس سیاست سفارش‌دهی (Q,R)، سفارش‌های خود را ارسال می‌کند، همچنین از هر محصول مقداری موجودی اطمینان نیز نگهداری می‌شود. هدف این مدل، کمینه‌سازی هزینه کل و میانگین زمان تحویل کالا به مشتریان است. آنها این



مسئله دو هدفه را با استفاده از الگوریتم‌های رقابت استعماری چندهدفه و شبیه‌سازی تبرید چندهدفه حل کردند [14]. لیو و همکاران (2015) به بررسی یک شبکه توزیع سه‌سطحی تک محصولی با در نظر گرفتن تصمیم‌های مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی پرداختند. این مسئله از یک سیاست مرور دائم موجودی (Q,R) پیروی می‌کند. ناوگان حمل‌ونقل همگن در نظر گرفته شده و برای حل مسئله الگوریتم ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است [15]. از مقاله‌هایی که مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی را با مجاز بودن کمبود به صورت پس‌افت در نظر می‌گیرد، مقاله قربانی و جوکار (2016) است. مدل آنها در زنجیره تأمین قطعات خودروسازی بررسی شد که چندمنبعی و چندمحصولی بود و هدف آن کمینه‌سازی هزینه کل به نظر می‌رسد. سیاست سفارش‌دهی، سیاست سفارش تا یک سطح مشخص است. از آنجایی که مدل چند دوره‌ای است، تقاضاهای با کمبود مواجه شده باید در دوره بعد ارضا شود [16]. ژاله‌چیان و همکاران (2016) مدل جدید مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی را برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار تحت عدم قطعیت در حالت چند دوره‌ای و چند محصولی پیشنهاد کردند. تأثیرات محیطی گاز CO<sub>2</sub>، مصرف سوخت، انرژی هدررفته، آثار اجتماعی موقعیت‌های کاری ایجاد شده و توسعه اقتصادی در این مقاله بررسی شده‌اند [17]. از اولین مقاله‌هایی که به کاربرد مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در توزیع محصولات فسادپذیر اشاره دارد، هیاسات و همکاران (2017) است. مسئله تک‌منبعی و تک‌محصولی بوده و تقاضای کالا قطعی است. هدف مسأله بالا، کمینه‌کردن هزینه کل شامل هزینه‌های احداث انبارها، حمل‌ونقل و نگهداری موجودی است که در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله شده است. آنها برای حل مدل، یک الگوریتم ژنتیک با نمایش خاصی از کروموزوم‌ها ارائه کردند [18]. سراگیه و همکاران (2018) یک روش ابتکاری مبتنی بر الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی شامل یک تأمین‌کننده، چندین انبار و خرده‌فروش ارائه دادند. تقاضای هر خرده‌فروش غیرقطعی و تک‌محصولی است و از توزیع معمولی پیروی می‌کند. هدف مسئله بالا، کمینه‌کردن هزینه احداث انبارها، هزینه موجودی در تأمین‌کننده، انبارها و خرده‌فروش‌ها و هزینه مسیریابی از انبارها به خرده‌فروش‌ها است که در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط فرموله



شده است [19]. رفیعی مجد و همکاران (2018) به مسأله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی برای محصولات فاسدشدنی در یک زنجیره تأمین سه سطحی شامل یک تأمین‌کننده و مراکز توزیع و چندین خرده‌فروش پرداختند. تقاضای مشتریان غیرقطعی بوده و هر مرکز توزیع از سیاست موجودی (Q,R) پیروی می‌کند. هدف مدل ذکرشده، حداقل کردن هزینه کل شامل هزینه احداث مراکز توزیع، هزینه مسیریابی از مراکز توزیع به خرده‌فروش‌ها، هزینه نگهداری موجودی در مراکز توزیع و خرده‌فروش‌ها و هزینه حمل‌ونقل از تأمین‌کننده به مراکز توزیع است. آنها برای حل مدل نیز از الگوریتم آزادسازی لاگرانژ استفاده کردند [20]. کاراکوستاس و همکاران (2019) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی با برون‌سپاری توزیع ارائه دادند. مسئله ایشان چنددوره‌ای، تک‌محصولی و در حالت قطعی با مجموعه‌ای از مشتریان و انبارها بررسی شد که هدف آن، کمینه‌سازی هزینه کل می‌باشد. آنها همچنین برای حل مدل از الگوریتم جستجوی همسایگی استفاده کردند [21].

با مروری بر مقاله‌های موجود در این حوزه، درصد پژوهش‌هایی که به‌طور مستقیم موضوع محصولات فسادپذیر را در زنجیره تأمین بررسی می‌کنند، بسیار کم است. بیشتر مسائل سیاست‌های موجودی را در ساختار زنجیره دنبال کرده‌اند. همین شکاف موجود باعث ورود این پژوهش به این حوزه شده است. همچنین نکته دیگری که در ادبیات موضوع برجسته است، توابع هدف استفاده‌شده برای مدل‌سازی مسائل زنجیره تأمین حلقه بسته می‌باشد. در مقاله‌های متعددی تابع هدف مسئله کمینه‌کردن هزینه‌ها در زنجیره تأمین حلقه بسته است. در این پژوهش کمینه‌کردن مجموع حداکثر زمان در کل شبکه در کنار اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، لحاظ شده است، زیرا یکی از فاکتورهای مؤثر در زمان انجام سفارش، زمان حمل در زنجیره می‌باشد. این مسئله در زنجیره تأمین کالاهای فسادپذیر به‌علت شرایط خاص محصول، از اهمیت ویژه‌تری برخوردار است. همچنین در نظر گرفتن مباحثی نظیر زمان رسیدن به مراکز و عزیمت از مراکز در مسیریابی، کمبود پس‌افت و فروش اذ دست‌رفته، فرض عدم قطعیت و برخی سیاست‌های به کار گرفته‌شده، از جمله ملاحظات است که در مدل‌سازی



لحاظ شده است که در کمتر مقاله‌هایی شاهد در نظر گرفتن همه این جوانب به صورت جامع هستیم. جدول 1 به مقایسه پژوهش حاضر با سایر مقاله‌های مشابه اخیر می‌پردازد.

جدول 1. مرور ادبیات مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی

| مقاله | نوع شبکه |       | چند دوره‌ای | چند محصولی | ظرفیت تسهیلات | تابع هدف                                                               |          | عدم قطعیت | مسیریابی               |                        |                  |        | کمبود |   | روش حل                                           |
|-------|----------|-------|-------------|------------|---------------|------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|------------------------|------------------------|------------------|--------|-------|---|--------------------------------------------------|
|       | مستقیم   | مکروس |             |            |               | تک هدفه                                                                | چند هدفه |           | زمان رسیدن وسیله نقلیه | زمان عزیمت وسیله نقلیه | فروش از دست رفته | پس افت |       |   |                                                  |
| [12]  | ü        | -     | -           | -          | ü             | هزینه کل $\hat{a}$                                                     |          | ü         | -                      | -                      | -                | -      | -     | - | الگوریتم ترکیبی جستجوی ممنوع و شبیه‌سازی تیرید   |
| [13]  | ü        | -     | -           | ü          | -             | هزینه کل $\hat{a}$                                                     |          | ü         | -                      | -                      | -                | -      | -     | - | الگوریتم شبیه‌سازی تیرید                         |
| [14]  | ü        | -     | ü           | ü          | ü             | هزینه کل $\hat{a}$ زمان تحویل کالا $\hat{a}$                           |          | ü         | ü                      | -                      | -                | -      | -     | - | الگوریتم‌های فرا ابتکاری چند هدفه                |
| [15]  | ü        | -     | -           | -          | -             | هزینه کل $\hat{a}$                                                     |          | ü         | -                      | -                      | -                | -      | -     | - | الگوریتم ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تیرید          |
| [16]  | ü        | -     | ü           |            | ü             | هزینه کل $\hat{a}$                                                     |          | -         | -                      | -                      | -                | ü      | -     | ü | الگوریتم شبیه‌سازی تیرید و رقابت استعماری        |
| [17]  | ü        | ü     | ü           |            | ü             | هزینه کل $\hat{a}$ اثرات زیست محیطی $\hat{a}$ موقعیت اجتماعی $\hat{a}$ |          | ü         | ü                      | -                      | -                | -      | -     | - | الگوریتم ژنتیک خود تطبیقی و جستجوی همسایگی متغیر |
| [18]  | ü        | -     | ü           | فاسد شدنی  | -             | هزینه کل $\hat{a}$                                                     |          | -         | -                      | -                      | -                | -      | -     | - | الگوریتم ژنتیک                                   |



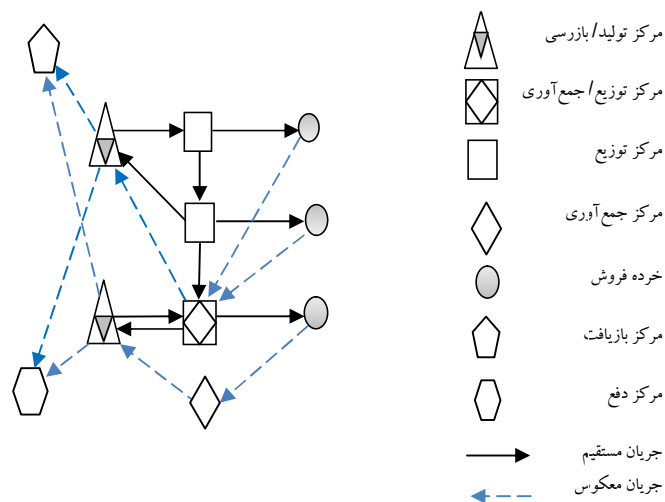
| مقاله     | نوع شبکه |       | چند دوره‌ای | چند محصولی | ظرفیت تسهیلات | تابع هدف                                                                       |          | عدم قطعیت | مسیریابی               |                        |                  |        | کمبود |   | روش حل                        |
|-----------|----------|-------|-------------|------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|------------------------|------------------------|------------------|--------|-------|---|-------------------------------|
|           | مستقیم   | معکوس |             |            |               | یک هدفه                                                                        | چند هدفه |           | زمان رسیدن وسیله نقلیه | زمان عزیمت وسیله نقلیه | فروش از دست رفته | پس افت |       |   |                               |
| [19]      | ü        | -     | -           | -          | ü             | هزینه کل $\hat{a}$                                                             |          | ü         | -                      | -                      | -                | -      | -     | - | الگوریتم شبیه‌سازی تیرید      |
| [20]      | ü        | -     | ü           | فلسد شدن   | ü             | هزینه کل $\hat{a}$                                                             |          | ü         | -                      | -                      | -                | -      | -     | - | آزادسازی لاگرانژ              |
| [21]      | ü        | -     | ü           | -          | ü             | هزینه کل $\hat{a}$                                                             |          | -         | -                      | -                      | -                | -      | -     | - | الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر |
| این پژوهش | ü        | ü     | ü           | فلسد شدن   | ü             | هزینه کل $\hat{a}$<br>زمان حمل در شبکه $\hat{a}$<br>اثرات زیست محیطی $\hat{a}$ |          | ü         | ü                      | ü                      | ü                | ü      | ü     | ü | الگوریتم ژنتیک                |

### 3- تعریف مسئله

ساختار کلی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی که شامل مجموعه‌ای از مراکز ترکیبی تولید/بازرسی، مراکز ترکیبی توزیع/جمع‌آوری، خرده‌فروش‌ها، مراکز بازیافت و دفع می‌باشد، در شکل 1 نشان داده شده است. شبکه بررسی شده در این پژوهش یک شبکه یکپارچه مستقیم و معکوس است که قابلیت حمایت از انواع صنایعی که محصولات با عمر محدود تولید می‌کنند، از جمله صنایع لبنی را دارد، به‌طوری که در جریان مستقیم، محصولات تولیدی مختلف از مراکز تولید/بازرسی با به‌کارگیری ناوگان ناهمگنی از وسایل نقلیه، از طریق مسیرهای موجود در زنجیره تأمین، به مراکز توزیع/جمع‌آوری منتقل می‌شوند و از آنجا در اختیار خرده‌فروش‌ها قرار می‌گیرند. در جریان معکوس، درصدی از تقاضای خرده‌فروش‌ها بعد از پایان عمر محصول به‌عنوان محصولات منقضی شده از راه مراکز توزیع/جمع‌آوری،



جمع‌آوری می‌شوند و سپس برای بررسی کیفیت آنها، به مراکز تولید/بازرسی انتقال پیدا می‌کنند. از این‌رو به دلیل مسائل بهداشتی، محصولات برگشتی دوباره وارد جریان رو به جلو نمی‌شوند. در واقع محصولات برگشتی پس از انجام بررسی‌های لازم دفع می‌شوند و یا به مراکز شخص سومی برای بازیافت و استفاده در صنعت دیگری فروخته می‌شوند. هدف این مدل تعیین تعداد و مکان بهینه استقرار مراکز و سطوح ظرفیت آنها، چگونگی تخصیص مراکز در سطوح متوالی، مقدار تولید، مقدار موجودی یا کمبود در هر مرکز تولید/بازرسی تأسیس‌شده در هر دوره، تعیین مسیر مناسب وسایل نقلیه از مرکز تولید/بازرسی به مراکز توزیع/جمع‌آوری، زمان رسیدن و زمان عزیمت وسیله‌نقلیه در مسیریابی و مقدار جریان بهینه بین مراکز تخصیص‌یافته به هم در هر دوره می‌باشد، به‌طوری که مجموع هزینه‌های سیستم، زمان حمل‌ونقل و انتشار گازهای آلاینده در زنجیره کمینه شود.



شکل 1. ساختار کلی زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی



### 3-1- فرضیه‌های مدل پیشنهادی

برخی از فرضیه‌های مهم در نظر گرفته شده برای این مدل به شرح زیر است:

1. مسئله مورد نظر چنددوره‌ای و چندمحصولی است.
2. هریک از مکان‌های در نظر گرفته شده برای مراکز، دارای سه سطح ظرفیت با هزینه متفاوت می‌باشند و در نهایت یک سطح ظرفیت برای هر مرکز انتخاب می‌شود.
3. در هر دوره مراکز تولید/بازرسی می‌توانند موجودی یا کمبود داشته باشند و یا هیچ‌کدام.
4. کمبود شامل فروش از دست‌رفته و پس‌افت می‌باشد.
5. مقدار کمبود پس‌افت در هر دوره، باید در دوره بعد به وسیله مرکز تولید/بازرسی تخصیص یافته به آن مرکز تأمین شود.
6. درصد کمبود پس‌افت و فروش از دست‌رفته از کل کمبود در هر دوره، براساس سیاست کاری از پیش تعیین می‌شود.
7. مکان خرده‌فروش از پیش تعیین شده و هر خرده‌فروش تقاضای غیرقطعی دارد.
8. هر محصول طول عمر مشخص و ثابت دارد (تاریخ انقضا دارد) و درصدی از تقاضای هر دوره در خرده‌فروش‌ها پس از اتمام دوره عمر به‌عنوان محصولات منقضی شده به مراکز توزیع/جمع‌آوری برگشت داده می‌شوند.
9. هر مرکز توزیع/جمع‌آوری مسئول جمع‌آوری محصولات منقضی شده از آن دسته خرده‌فروشان است که تقاضای آنها به‌وسیله آن مرکز توزیع/جمع‌آوری تأمین شده است.
10. فرض بر این است که تولید اول دوره انجام می‌شود و مجموع آن با موجودی انتهای دوره قبل همیشه مثبت است.
11. مسیریابی، از مرکز تولید/بازرسی به مراکز توزیع/جمع‌آوری در نظر گرفته شده است.
12. در هر مسیر، یک وسیله نقلیه باید از یک مرکز تولید/بازرسی تأسیس شده شروع به حرکت کند و تقاضای مراکز توزیع/جمع‌آوری واقع در مسیر را برآورده سازد و در نهایت به همان مرکز تولید/بازرسی باز گردد.



13. نوع ناوگان حمل‌ونقل موجود ناهمگن است، بنابراین وسایل حمل ظرفیت و هزینه‌های متفاوت دارند.

### 3-2- مدل تصادفی چندهدفه

در این مقاله یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای با چند هدف پیشنهاد شده است که عدم قطعیت مربوط به تقاضا و نرخ محصولات برگشتی را در فرایند طراحی در برمی‌گیرد. در مسئله مطرح شده، پارامترهای غیرقطعی در مجموعه‌ای از سناریوهای گسسته با احتمال پیشامد داده شده بیان می‌شوند. همچنین متغیرهای تصمیم‌گیری در مدل ارائه شده به دو دسته متغیرهای مرحله اول و دوم تقسیم می‌شوند. در دسته نخست متغیرهایی قرار می‌گیرند که مقدار آنها مستقل از سناریوهای عدم قطعیت خواهد بود، در نتیجه مقدار این متغیرها پیش از درک عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی تعیین خواهد شد. در سطح دوم نیز متغیرهای تحت تأثیر عدم قطعیت در تصمیم‌های تاکتیکی و عملیاتی در نظر گرفته می‌شوند که تمامی آنها تحت تأثیر سناریوها قرار دارند.

### 3-3- معرفی مجموعه‌ها و اندیس‌ها

|                            |                                                    |       |
|----------------------------|----------------------------------------------------|-------|
| $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ | مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز ترکیبی تولید/بازرسی   | $I$   |
| $s \in \{1, 2, \dots, S\}$ | مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز ترکیبی توزیع/جمع‌آوری | $S$   |
| $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ | مجموعه مکان‌های ثابت خرده‌فروش‌ها                  | $K$   |
| $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ | مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز بازیافت               | $N$   |
| $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ | مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز دفع                   | $L$   |
| $v \in \{1, 2, \dots, V\}$ | مجموعه وسایل نقلیه                                 | $V$   |
| $(j \in i, s, l, n)$       | مجموعه سطوح ظرفیت در دسترس مرکز $j$                | $B_j$ |
| $r \in \{1, 2, \dots, R\}$ | مجموعه محصولات                                     | $R$   |
| $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ | مجموعه دوره زمانی                                  | $T$   |
| $e \in \{1, 2, \dots, E\}$ | مجموعه سناریوها                                    | $E$   |



### 3-4- پارامترهای قطعی موجود در مدل

|                                                                                                            |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| هزینه احداث مرکز تولید/بازرسی $i$ با سطح ظرفیت $b$ , $\forall b \in B_i$                                   | $F_i^b$         |
| هزینه احداث مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ با سطح ظرفیت $b$ , $\forall b \in B_s$                                 | $F_s^b$         |
| هزینه احداث مرکز بازیافت $n$ با سطح ظرفیت $b$ , $\forall b \in B_n$                                        | $F_n^b$         |
| هزینه احداث مرکز دفع $l$ با سطح ظرفیت $b$ , $\forall b \in B_l$                                            | $F_l^b$         |
| میزان آلاینده منتشرشده حاصل از احداث مرکز تولید/بازرسی $i$ با سطح ظرفیت $b$ , $\forall b \in B_i$          | $PO_i^b$        |
| میزان آلاینده منتشرشده حاصل از احداث مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ با سطح ظرفیت $b$ , $\forall b \in B_s$        | $PO_s^b$        |
| میزان آلاینده منتشرشده حاصل از احداث مرکز بازیافت $n$ با سطح ظرفیت $b$ , $\forall b \in B_n$               | $PO_n^b$        |
| میزان آلاینده منتشرشده حاصل از احداث مرکز دفع $l$ با سطح ظرفیت $b$ , $\forall b \in B_l$                   | $PO_l^b$        |
| هزینه تولید هر واحد محصول $r$ در مرکز تولید/بازرسی $i$ در دوره $t$                                         | $PI_{irt}$      |
| هزینه بازرسی هر واحد محصول برگشتی $r$ در مرکز تولید/بازرسی $i$ در دوره $t$                                 | $PH_{irt}$      |
| هزینه پردازش هر واحد محصول $r$ در مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ در دوره $t$                                      | $PS_{srt}$      |
| هزینه پردازش هر واحد محصول جمع‌آوری شده $r$ در مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ در دوره $t$                         | $PC_{srt}$      |
| هزینه دفع هر واحد محصول $r$ در مرکز دفع $l$ در دوره $t$                                                    | $PL_{lrt}$      |
| هزینه بازیافت هر واحد محصول $r$ در مرکز بازیافت $n$ در دوره $t$                                            | $PN_{nrt}$      |
| فاصله زمانی بین خرده‌فروش $k$ و مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$                                                    | $TKS_{ks}$      |
| فاصله زمانی بین مرکز تولید/بازرسی $i$ و مرکز دفع $l$                                                       | $TIL_{il}$      |
| فاصله زمانی بین مرکز تولید/بازرسی $i$ و مرکز بازیافت $n$                                                   | $TIN_{in}$      |
| زمان عزیمت وسیله نقلیه $v$ از مرکز تولید/بازرسی $i$ در دوره $t$                                            | $TO_{ivt}$      |
| فاصله سفر بین مرکز تولید/بازرسی $i$ و مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$                                              | $C_{is}$        |
| متوسط سرعت وسیله نقلیه $v$ مرکز تولید و بازرسی $i$                                                         | $V'_{iv}$       |
| فاصله بین مراکز توزیع/جمع‌آوری $s$ و $s'$                                                                  | $CS_{s's}$      |
| زمان موردنیاز برای تخلیه هر واحد محصول از وسیله‌نقلیه $v$ مرکز تولید/بازرسی $i$ در مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ | $TD_{ivs}$      |
| هزینه حمل هر واحد محصول $r$ از مرکز تولید/بازرسی $i$ به مرکز دفع $l$ در دوره $t$                           | $TRD_{ilrt}$    |
| هزینه حمل هر واحد محصول $r$ از مرکز تولید/بازرسی $i$ به مرکز بازیافت $n$ در دوره $t$                       | $TRR_{inrt}$    |
| ظرفیت تولید محصول $r$ در مرکز تولید/بازرسی $i$ با سطح ظرفیت $b$ در دوره $t$ با توجه به منابع موجود         | $Cappr_{irt}^b$ |
| ظرفیت بازیافت محصول $r$ در مرکز بازیافت $n$ با سطح ظرفیت $b$                                               | $Cap_{nr}^b$    |
| ظرفیت مرکز دفع $l$ با سطح ظرفیت $b$                                                                        | $Cap_l^b$       |
| ظرفیت وسیله نقلیه $v$ مرکز تولید/بازرسی $i$                                                                | $cap_{iv}$      |
| هزینه هر واحد حمل و نقل وسیله نقلیه $v$ در مرکز تولید/بازرسی $i$ در دوره $t$                               | $TC_{ivt}$      |
| هزینه ثابت وسیله نقلیه $v$ مرکز تولید/بازرسی $i$                                                           | $FC_{iv}$       |
| میزان بودجه در دسترس برای مرکز تولید/بازرسی $i$ در دوره $t$                                                | $BU_{it}$       |
| حجم هر واحد محصول $r$                                                                                      | $VOL_r$         |



|                |                                                                                                   |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $ET$           | متوسط میزان آلاینده منتشرشده در هر واحد زمانی به وسیله نقلیه                                      |
| $LP_r$         | عمر محصول $r$ ( $LP_r \geq 2$ )                                                                   |
| $PP_{ir}$      | میزان آلاینده منتشرشده در اثر تولید هر واحد محصول $r$ در مرکز تولید/بازرسی $i$                    |
| $PR_{nr}$      | میزان آلاینده منتشرشده در اثر بازیافت هر واحد محصول $r$ در مرکز بازیافت $n$                       |
| $PD_{lr}$      | میزان آلاینده منتشرشده در اثر دفع هر واحد محصول $r$ در مرکز دفع $l$                               |
| $h_{irt}$      | هزینه نگهداری موجودی در مرکز تولید/بازرسی $i$ به ازای هر واحد محصول $r$ در دوره $t$               |
| $h'_{irt}$     | هزینه کمبود هر واحد پس‌افت در مرکز تولید/بازرسی $i$ به ازای هر واحد محصول $r$ در دوره $t$         |
| $h''_{irt}$    | هزینه کمبود هر واحد فروش اذیت‌رفته در مرکز تولید/بازرسی $i$ به ازای هر واحد محصول $r$ در دوره $t$ |
| $\theta_{irt}$ | درصد کمبود پس‌افت از کل کمبود در مرکز تولید/بازرسی $i$ از محصول $r$ در دوره $t$                   |
| $T$            | زمان یک دوره                                                                                      |
| $\alpha_r$     | نرخ بازیافت محصول برگشتی $r$                                                                      |
| $BM$           | عدد مثبت خیلی بزرگ                                                                                |

### 5-3- پارامترهای وابسته به سناریو

|             |                                                                         |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $D_{krt}^e$ | تقاضای خرده‌فروش $k$ برای هر واحد محصول $r$ در دوره $t$ تحت سناریوی $e$ |
| $\beta_r^e$ | نرخ برگشت محصول $r$ از خرده‌فروش‌ها تحت سناریوی $e$                     |
| $P_e$       | احتمال وقوع سناریوی $e$                                                 |

### 6-3- متغیرهای تصمیم‌گیری مرحله اول

|             |                                                                                              |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $W_i^b$     | اگر مرکز تولید/بازرسی $i$ با سطح ظرفیت $b$ تأسیس شود 1 در غیر اینصورت 0                      |
| $W_s^b$     | اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ با سطح ظرفیت $b$ تأسیس شود 1 در غیر این صورت 0                   |
| $W_l^b$     | اگر مرکز دفع $l$ با سطح ظرفیت $b$ تأسیس شود 1 در غیر این صورت 0                              |
| $W_n^b$     | اگر مرکز بازیافت $n$ با سطح ظرفیت $b$ تأسیس شود 1 در غیر این صورت 0                          |
| $XKS_{kst}$ | اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ به خرده‌فروش $k$ در دوره $t$ تخصیص پیدا کند 1 در غیر این صورت 0  |
| $XIL_{ilt}$ | اگر مرکز تولید/بازرسی $i$ به مرکز دفع $l$ در دوره $t$ تخصیص پیدا کند 1 در غیر این صورت 0     |
| $XIN_{int}$ | اگر مرکز تولید/بازرسی $i$ به مرکز بازیافت $n$ در دوره $t$ تخصیص پیدا کند 1 در غیر این صورت 0 |

### 7-3- متغیرهای تصمیم‌گیری مرحله دوم

|              |                                                                                                                                    |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $X_{ivst}^e$ | اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ به کمک وسیله نقلیه $v$ مرکز تولید/بازرسی $i$ تحت سناریوی $e$ در دوره $t$ تأمین شود 1 در غیر این صورت 0 |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



|                   |                                                                                                                                                                                  |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $X_{ivst}^e$      | اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ تحت سناریوی $e$ ، اولین مرکز ملاقات‌شده به وسیله وسیله نقلیه $v$ مرکز تولید/بازرسی $i$ در دوره $t$ باشد 1 در غیر این صورت 0                          |
| $X_{ivst}^{''e}$  | اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ تحت سناریوی $e$ ، آخرین مرکز ملاقات‌شده به وسیله وسیله نقلیه $v$ مرکز تولید/بازرسی $i$ در دوره $t$ باشد 1 در غیر این صورت 0                          |
| $XSS_{ivs'st}^e$  | اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ بلافاصله بعد از مرکز توزیع/جمع‌آوری $s'$ به وسیله وسیله نقلیه $v$ مرکز تولید/بازرسی $i$ تحت سناریوی $e$ ، در دوره $t$ ملاقات شود 1 در غیر این صورت 0 |
| $M_{irt}^e$       | اگر مرکز تولید/بازرسی $i$ از محصول $r$ در انتهای دوره $t$ تحت سناریوی $e$ موجودی داشته باشد 1 در غیر این صورت 0                                                                  |
| $Z_{irt}^e$       | اگر مرکز تولید/بازرسی $i$ از محصول $r$ تحت سناریوی $e$ ، در دوره $t$ کمبود نداشته باشد 1 در غیر این صورت 0                                                                       |
| $T_{irt}^e$       | بخشی از دوره $T$ که مرکز تولید/بازرسی $i$ از محصول $r$ تحت سناریوی $e$ موجودی دارد.                                                                                              |
| $T_{irt}^{''e}$   | بخشی از دوره $T$ که مرکز تولید/بازرسی $i$ از محصول $r$ تحت سناریوی $e$ کمبود دارد.                                                                                               |
| $\lambda_{srt}^e$ | درصد کمبود مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ از محصول $r$ از کل کمبود تحت سناریوی $e$ در دوره $t$ .                                                                                        |
| $OSK_{skrt}^e$    | مقدار محصول حمل‌شده $r$ از مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ به خرده‌فروش $k$ در دوره $t$ تحت سناریوی $e$                                                                                  |
| $OIL_{ilrt}^e$    | مقدار محصول حمل‌شده $r$ از مرکز تولید/بازرسی $i$ به مرکز دفع $l$ در دوره $t$ تحت سناریوی $e$                                                                                     |
| $OIN_{inrt}^e$    | مقدار محصول حمل‌شده $r$ از مرکز تولید/بازرسی $i$ به مرکز بازیافت $n$ در دوره $t$ تحت سناریوی $e$                                                                                 |
| $RSI_{sirt}^e$    | مقدار محصول حمل‌شده $r$ که از مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ به مرکز تولید/بازرسی $i$ در دوره $t$ تحت سناریوی $e$                                                                       |
| $RKS_{ksrt}^e$    | مقدار محصول برگشتی $r$ که از خرده‌فروش $k$ به مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ در دوره $t$ تحت سناریوی $e$ ارسال می‌شود.                                                                  |
| $INV_{irt}^e$     | موجودی محصول $r$ در مرکز تولید/بازرسی $i$ در انتهای دوره $t$ تحت سناریوی $e$                                                                                                     |
| $D_{srt}^e$       | تقاضای مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ برای محصول $r$ در دوره $t$ تحت سناریوی $e$                                                                                                        |
| $Q_{irt}^e$       | مقدار تولید محصول $r$ در مرکز تولید/بازرسی $i$ در دوره $t$ تحت سناریوی $e$                                                                                                       |
| $AT_{ivst}^e$     | زمان رسیدن وسیله نقلیه $v$ مرکز تولید/بازرسی $i$ به مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ در دوره $t$ تحت سناریوی $e$                                                                          |
| $GT_{ivst}^e$     | زمان عزیمت وسیله نقلیه $v$ مرکز تولید/بازرسی $i$ از مرکز توزیع/جمع‌آوری $s$ در دوره $t$ تحت سناریوی $e$                                                                          |
| $TOC_{it}^e$      | مجموع هزینه‌های مرکز تولید/بازرسی $i$ در دوره $t$ تحت سناریوی $e$                                                                                                                |

### 8-3- مدل ریاضی

#### 8-3-1- توابع هدف

باتوجه به اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای ذکرشده، توابع هدف مدل ریاضی به صورت صفحه بعد ارائه می‌شود:



$$\begin{aligned} MIN Z_1 = & \sum_t \max_i \left[ \sum_v \left( \max_s \sum_e \sum_{b \in B_s} P_e \cdot W_s^b \cdot X_{ivst}^e \cdot AT_{ivst}^e \right) - TO_{ivt} \right] \\ & + \sum_t \max_k \left[ \sum_s TKS_{ks} \cdot XKS_{kst} \right] + \sum_t \max_i \left[ \sum_l TIL_{il} \cdot XIL_{ilt} \right] + \sum_t \max_n \left[ \sum_r TIN_{in} \cdot XIN_{int} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} MIN Z_2 = & \sum_i \sum_{b \in B_i} F_i^b W_i^b + \sum_s \sum_{b \in B_s} F_s^b W_s^b + \sum_l \sum_{b \in B_l} F_l^b W_l^b + \sum_n \sum_{b \in B_n} F_n^b W_n^b \\ & + \sum_e P_e \left[ \sum_t \sum_i TOC_{it}^e + \sum_s \sum_k \sum_r \sum_t XKS_{kst} (OSK_{skrt}^e \cdot PS_{srt} + RKS_{ksrt}^e \cdot PC_{srt}) \right. \\ & \left. + \sum_l \sum_i \sum_r \sum_t XIL_{ilt} \cdot OIL_{ilrt}^e \cdot PL_{lrt} + \sum_n \sum_i \sum_r \sum_t XIN_{int} \cdot OIN_{inrt}^e \cdot PN_{nrt} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} MIN Z_3 = & \sum_i \sum_s \sum_v \sum_{b \in B_s} \sum_t \sum_e P_e \cdot ET \cdot W_s^b \left[ (X'_{ivst}^e + X''_{ivst}^e) \frac{C_{is}}{V'_{iv}} + \sum_{s'=1}^s XSS_{ivs'st}^e \cdot \frac{CS_{s's}}{V'_{iv}} \right] \\ & + \sum_k \sum_s \sum_t ET \cdot TKS_{ks} \cdot XKS_{kst} + \sum_l \sum_n \sum_t ET \cdot TIN_{in} \cdot XIN_{int} \\ & + \sum_i \sum_l \sum_t ET \cdot TIL_{il} \cdot XIL_{ilt} + \sum_{b \in B_i} \sum_l PO_l^b W_i^b + \sum_{b \in B_s} \sum_s PO_s^b W_s^b \\ & + \sum_{b \in B_n} \sum_n PO_n^b W_n^b + \sum_{b \in B_l} \sum_l PO_l^b W_l^b + \sum_t \sum_r \sum_e P_e Q_{irt}^e \cdot PP_{itr} \\ & + \sum_l \sum_n \sum_r \sum_t \sum_e P_e \cdot OIN_{inrt}^e \cdot PR_{nrt} \cdot XIN_{int} + \sum_l \sum_l \sum_r \sum_t \sum_e P_e \cdot OIL_{ilrt}^e \cdot PD_{lir} \cdot XIL_{ilt} \end{aligned}$$

تابع هدف اول، مجموع حداکثر زمان بین مراکز در دو سطح متوالی تخصیص یافته به هم را کمینه می‌کند. بخش اول که وابسته به سناریوهاست، بیانگر حداکثر زمان مورد انتظار در سطوح بین مراکز تولید/بازرسی و مراکز توزیع/جمع‌آوری است. سه بخش دیگر به ترتیب بیانگر حداکثر زمان در سطوح بین مراکز توزیع/جمع‌آوری، خرده‌فروش‌ها و حداکثر زمان بین مراکز تولید/بازرسی با مراکز دفع و بازیافت می‌باشد. تابع هدف دوم، مربوط به هزینه کل مورد انتظار شامل هزینه‌های مرحله اول و هزینه‌های مورد انتظار مرحله دوم است. هزینه‌های مرحله اول که مستقل از سناریوهاست، شامل هزینه‌های ثابت احداث مراکز با یک سطح ظرفیت معین می‌باشد. هزینه‌های مرحله دوم که مربوط به ارزش انتظاری هزینه‌های وابسته به سناریوهاست، شامل هزینه‌های تولید، بازرسی، نگهداری موجودی، کمبود (فروش ازدست‌رفته



و پس‌افت) و حمل‌ونقل مرکز تولید/بازرسی  $i$  و درنهایت هزینه عملیاتی مراکز توزیع/جمع‌آوری، بازیافت و دفع در هر دوره می‌باشد. تابع هدف سوم میزان انتشار گازهای آلاینده در سرتاسر شبکه را کمینه می‌کند که از سه بخش اصلی تشکیل شده است. بخش اول، میزان آلاینده‌گی را که به‌واسطه حمل‌ونقل وسایل نقلیه در بین گره‌های مختلف شبکه در محیط انتشار پیدا می‌کند، محاسبه می‌کند. بخش دوم میزان آلاینده‌گی که در نتیجه احداث هریک از مراکز در محیط انتشار پیدا می‌کند، در نظر گرفته شده است و در بخش سوم، میزان آلاینده‌گی مورد انتظار که به‌واسطه اجرای فرایندهای مختلف در مراکز تولید/بازرسی، بازیافت و دفع در محیط انتشار پیدا می‌کند، لحاظ شده است.

### 3-8-2- محدودیت‌ها

$$\sum_{b \in B_i} W_i^b \leq 1 \quad \forall i \quad (1)$$

$$\sum_{b \in B_s} W_s^b \leq 1 \quad \forall s \quad (2)$$

$$\sum_{b \in B_n} W_n^b \leq 1 \quad \forall n \quad (3)$$

$$\sum_{b \in B_l} W_l^b \leq 1 \quad \forall l \quad (4)$$

$$\sum_s XKS_{kst} = 1 \quad \forall k, t \quad (5)$$

$$XKS_{kst} \leq \sum_{b \in B_s} W_s^b \quad \forall s, k, t \quad (6)$$

$$\sum_n XIN_{int} = \sum_{b \in B_i} W_i^b \quad \forall i, t \quad (7)$$

$$\sum_l XIL_{ilt} = \sum_{b \in B_i} W_i^b \quad \forall i, t \quad (8)$$

محدودیت‌های 1 تا 4 بیانگر این است که اگر هریک از مراکز تأسیس شوند، آنگاه بی‌شک یک سطح ظرفیت به آنها اختصاص پیدا می‌کند. محدودیت 5 تضمین می‌کند که هر خرده‌فروش بی‌گمان از یک مرکز توزیع/جمع‌آوری تأمین می‌شود. محدودیت 6 بیان می‌کند



که خرده‌فروش  $k$  در صورتی به مرکز توزیع/جمع‌آوری  $s$  تخصیص داده می‌شود که آن مرکز تأسیس شده باشد. محدودیت‌های 7 و 8 نشان می‌دهند اگر مرکز تولید/بازرسی  $i$  با سطح ظرفیت  $b$  تأسیس شود، آنگاه آن مرکز بی‌شک به یک مرکز بازافت و دفع تخصیص پیدا می‌کند.

$$AT_{ivst}^e = X'_{ivst} \left( T0_{ivt} + \frac{C_{is}}{V'_{iv}} \right) + \sum_{s'=1}^s XSS_{ivs't}^e \left( GT_{ivs't}^e + \frac{CS_{s't}}{V'_{iv}} \right) \quad \forall i, v, s, t, e \quad (9)$$

$$GT_{ivst}^e = AT_{ivst}^e + TD_{ivs} \cdot X_{ivst}^e \sum_r [M_{irt}^e \cdot D_{srt}^e + (1 - M_{irt}^e) Z_{irt}^e \cdot D_{srt}^e + (1 - M_{irt}^e)(1 - Z_{irt}^e) D_{srt}^e \cdot (1 - \lambda_{srt}^e)] \quad \forall i, v, s, t, e \quad (10)$$

$$X'_{ivst} + \sum_{s'=1}^s XSS_{ivs't}^e = \sum_{s'=1}^s XSS_{ivss't}^e + X''_{ivst} \quad \forall i, v, s, t \quad (11)$$

$$\sum_v \sum_s X'_{ivst} = \sum_{b \in B_i} W_i^b \quad \forall i, t \quad (12)$$

$$X_{ivst}^e \leq \sum_{s'} X'_{ivs't} \quad \forall i, v, s, t, e \quad (13)$$

$$\sum_i \sum_v X_{ivst}^e = \sum_{b \in B_s} W_s^b \quad \forall s, t, e \quad (14)$$

$$X_{ivst}^e = X'_{ivst} + \sum_{s'} XSS_{ivs't}^e \quad \forall i, v, s, t, e \quad (15)$$

$$\sum_s X'_{ivst} = \sum_s X''_{ivst} \quad \forall i, v, t, e \quad (16)$$

$$\sum_r VOL_r \sum_s X_{ivst}^e [M_{irt}^e \cdot D_{srt}^e + (1 - M_{irt}^e) Z_{irt}^e \cdot D_{srt}^e + (1 - M_{irt}^e)(1 - Z_{irt}^e) D_{srt}^e \cdot (1 - \lambda_{srt}^e)] \leq cap_{iv} \quad \forall i, v, t, e \quad (17)$$

محدودیت 9 زمان رسیدن وسیله نقلیه  $v$  مرکز تولید/بازرسی  $i$  به مرکز توزیع/جمع‌آوری  $s$  را در دوره  $t$ ، تحت هر سناریو نشان می‌دهد. محدودیت 10 زمان عزیمت وسیله نقلیه  $v$  مرکز تولید/بازرسی  $i$  از مرکز توزیع/جمع‌آوری  $s$  را در دوره  $t$ ، تحت هر سناریو بیان می‌کند. محدودیت 11 پیوستگی مسیر را تحت هر سناریو تضمین می‌کند. محدودیت 12 نشان می‌دهد که اگر مرکز تولید/بازرسی  $i$  با سطح ظرفیت  $b$  تأسیس شود، آنگاه تحت هر سناریو، وسیله‌نقلیه آن مرکز بی‌گمان یک اولین مرکز توزیع/جمع‌آوری ملاقات‌شده دارد. محدودیت



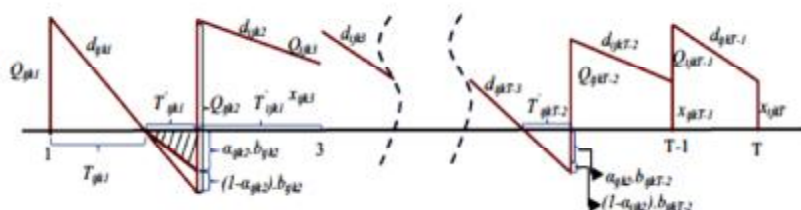
13 بیانگر آن است که تحت هر سناریو، اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری  $s$  از مرکز تولید/بازرسی  $i$  تأمین شود، آن مرکز تولید/بازرسی بی‌گمان به یک  $s'$  (اولین مرکز توزیع/جمع‌آوری متصل است. محدودیت 14 تضمین می‌کند اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری  $s$  با سطح ظرفیت  $b$  تأسیس شود، آنگاه تحت هر سناریو از یک مرکز تولید/بازرسی تأمین می‌شود. محدودیت 15 نشان می‌دهد که تحت هر سناریو، اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری  $s$  از مرکز تولید/بازرسی  $i$  تأمین شود، آنگاه آن مرکز در مسیر وسیله حمل‌ونقل مرکز تولید/بازرسی  $i$  قرار دارد (اولین مرکز  $s$  در مسیر، یا بعد از مرکز  $s'$  در مسیر). محدودیت 16 تضمین می‌کند که تحت هر سناریو، اگر مرکز تولید/بازرسی  $i$  اولین مرکز توزیع/جمع‌آوری تخصیص‌یافته را ملاقات کند، آنگاه بی‌گمان آخرین مرکز توزیع/جمع‌آوری تخصیص‌یافته را هم ملاقات می‌کند. محدودیت 17 نشان می‌دهد که تحت هر سناریو میزان کل تقاضای تأمین‌شده مراکز توزیع/جمع‌آوری در هر دوره باید حداکثر به اندازه ظرفیت وسیله‌نقلیه  $v$  باشد.

$$\begin{aligned}
 TOC_{it}^e = & \sum_r Q_{irt}^e \cdot PI_{irt} + \sum_r \sum_s RSI_{sirt}^e \cdot PH_{irt} \\
 & + \sum_r M_{irt}^e \left[ \frac{(INV_{ir(t-1)}^e + (M_{ir(t-1)}^e - 1)(1 - Z_{ir(t-1)}^e)INV_{ir(t-1)}^e(1 - \theta_{ir(t-1)}^e) + Q_{irt}^e + INV_{irt}^e)T}{2} \right] h_{irt} \\
 & + \sum_r (1 - M_{irt}^e)Z_{irt}^e \left[ \frac{(INV_{ir(t-1)}^e + (M_{ir(t-1)}^e - 1)(1 - Z_{ir(t-1)}^e)INV_{ir(t-1)}^e(1 - \theta_{ir(t-1)}^e) + Q_{irt}^e)T}{2} \right] h_{irt} \\
 & + \sum_r (1 - M_{irt}^e)(1 - Z_{irt}^e) \left[ \frac{(INV_{ir(t-1)}^e + (M_{ir(t-1)}^e - 1)(1 - Z_{ir(t-1)}^e)INV_{ir(t-1)}^e(1 - \theta_{ir(t-1)}^e) + Q_{irt}^e)T'_{irt}}{2} \right] h_{irt} \\
 & + \sum_r (M_{irt}^e - 1)(1 - Z_{irt}^e) \frac{\theta_{irt} \cdot INV_{irt}^e}{2} \cdot (T''_{irt} h'_{irt}) + \sum_r (M_{irt}^e - 1)(1 - Z_{irt}^e) \frac{(1 - \theta_{irt}) \cdot INV_{irt}^e}{2} \cdot (T''_{irt} \cdot h''_{irt}) \\
 & + \sum_v \sum_s [(X'_{ivst} + X''_{ivst}), C_{is}, TC_{ivt} + X'_{ivst}, FC_{iv}] + \sum_s \sum_{s'} \sum_v XSS_{ivs'st}^e \cdot CS_{ss'} \cdot TC_{ivt} \\
 & + \sum_n \sum_r XIN_{int} \cdot OIN_{inrt} TRR_{inrt} + \sum_l \sum_r XIL_{ilt} \cdot OIL_{ilrt} \cdot TRD_{ilrt} \quad \forall i, t, e \quad (18)
 \end{aligned}$$

محدودیت 18 مجموع هزینه‌های مرکز تولید/بازرسی  $i$  را تحت هر سناریو نشان می‌دهد. عبارت‌های اول و دوم این محدودیت، مربوط به هزینه‌های تولید و بازرسی در هر دوره می‌باشد. عبارت‌های سوم تا ششم، بیانگر هزینه‌های نگهداری موجودی و کمبود (روش از



دست‌رفته و پس‌افت) در هر دوره می‌باشد. عبارت‌های هفتم و هشتم، هزینه مسیریابی از مرکز تولید/بازرسی  $i$  به مراکز توزیع/جمع‌آوری تخصیص‌یافته در هر دوره را نشان می‌دهد و عبارت‌های نهم و دهم، بیانگر هزینه حمل‌ونقل از مرکز تولید/بازرسی  $i$  به مراکز بازیافت و دفع در هر دوره می‌باشد (شکل 2).



شکل 2. نمایش گرافیکی سیستم موجودی در شبکه زنجیره تأمین [22]

در محدودیت 18 باتوجه به شکل 2، زمانی که موجودی انتهای دوره مثبت باشد، مساحت دوزنقه برای سطح موجودی مثبت در آن دوره محاسبه می‌شود. در حالتی که موجودی انتهای دوره، صفر است، مساحت مثلث برای موجودی در آن دوره محاسبه شده و زمانی که موجودی انتهای دوره منفی است، در بخشی از دوره که موجودی داریم  $(T_{irt}^e)$ ، مساحت بالای خط و در بخشی از دوره که با کمبود مواجهیم  $(T_{irt}^{''e})$ ، جمع مساحت‌های زیر خط برای موجودی منفی به صورت فروش از دست‌رفته و پس‌افت محاسبه می‌شود.

$$TOC_{it}^e \leq BU_{it} \quad \forall i, t, e \quad (19)$$

$$INV_{irt}^e = INV_{ir(t-1)}^e - (1 - \theta_{ir(t-1)})INV_{ir(t-1)}^e(1 - M_{irt}^e)(1 - Z_{irt}^e) + Q_{irt}^e - \sum_s \left( D_{srt}^e \cdot \sum_v X_{ivst}^e \right) \quad \forall i, r, t, e \quad (20)$$

$$INV_{irt}^e \leq BM \cdot M_{irt}^e \quad \forall i, r, t, e \quad (21)$$

$$INV_{irt}^e > (M_{irt}^e - 1) \cdot BM \quad \forall i, r, t, e \quad (22)$$

$$INV_{irt}^e \leq Z_{irt}^e - 1 \quad \forall i, r, t, e \quad (23)$$



$$INV_{irt}^e \geq (1 - Z_{irt}^e) \cdot (-BM) \quad \forall i, r, t, e \quad (24)$$

محدودیت 19 حداکثر بودجه در دسترس برای هزینه‌های مرکز تولید/بازرسی  $i$  در دوره  $t$  تحت هر سناریو نشان می‌دهد. محدودیت 20 بیانگر میزان موجودی مرکز تولید/بازرسی  $i$  در انتهای دوره  $t$  تحت هر سناریو می‌باشد. محدودیت‌های 21 و 22 رابطه موجودی مرکز تولید/بازرسی  $i$  در انتهای دوره  $t$  با متغیر باینری  $M_{irt}^e$  را نشان می‌دهند. محدودیت‌های 23 و 24 بیانگر رابطه موجودی مرکز تولید/بازرسی  $i$  در انتهای دوره  $t$  با متغیر باینری  $Z_{irt}^e$  می‌باشد.

$$D_{srt}^e = \sum_k XKS_{kst} \cdot D_{krt}^e \quad \forall s, r, t, e \quad (25)$$

$$D_{irt}^e = \sum_v \sum_s X_{ivst} \cdot D_{srt}^e \quad \forall i, r, t, e \quad (26)$$

$$T_{irt}''^e = \frac{(M_{irt}^e - 1)(1 - Z_{irt}^e) \cdot INV_{irt}^e}{D_{irt}^e} \quad \forall i, r, t, e \quad (27)$$

$$T_{irt}'^e + T_{irt}''^e = T \quad \forall i, r, t, e \quad (28)$$

$$(M_{irt}^e - 1)(1 - Z_{irt}^e)INV_{irt}^e = \sum_n \sum_s X_{ivst}^e \cdot D_{srt}^e \cdot \lambda_{srt}^e \quad \forall i, r, t, e \quad (29)$$

محدودیت 25 بیانگر این است که تقاضای مرکز توزیع/جمع‌آوری  $s$  تحت هر سناریو با مجموع تقاضاهای خرده‌فروشان تخصیص‌یافته به آن مرکز برابر است. محدودیت 26 بیانگر مجموع تقاضاهای مراکز توزیع/جمع‌آوری تخصیص‌یافته به هر مرکز تولید/بازرسی  $i$  تحت هر سناریو می‌باشد. محدودیت 27 بخشی از یک دوره را که مرکز تولید/بازرسی  $i$  کمبود دارد، تحت هر سناریو نشان می‌دهد. محدودیت 28 بیانگر این است که مجموع زمان‌های در حالت کمبود و در حالت موجودی در هر دوره برابر  $T$  می‌شود. محدودیت 29 نشان می‌دهد که مجموع مقدار کمبودهای مراکز توزیع/جمع‌آوری تخصیص‌یافته به مرکز تولید/بازرسی  $i$  در دوره  $t$  با مقدار کمبود مرکز تولید/بازرسی  $i$  در دوره  $t$ ، تحت هر سناریو برابر است.



$$OSK_{skrt}^e \leq XK S_{kst}^e \cdot D_{krt}^e \quad \forall k, s, r, t, e \quad (30)$$

$$\sum_k OSK_{skrt}^e = D_{srt}^e \cdot (1 - \lambda_{srt}^e) \quad \forall s, r, t, e \quad (31)$$

$$RKS_{ksrt}^e = \beta_r^e \cdot OSK_{skrt}^e \cdot LP_r \quad \forall k, s, r, e, t > LP_r \quad (32)$$

$$RKS_{ksrt}^e = 0 \quad \forall k, s, r, e, t \leq LP_r \quad (33)$$

$$\sum_k RKS_{ksrt}^e = \sum_i RSI_{sirt}^e \quad \forall s, r, t, e \quad (34)$$

$$\sum_k OIN_{inrt}^e = \alpha_r \cdot \sum_s RSI_{sirt}^e \quad \forall i, r, t, e \quad (35)$$

$$\sum_l OIL_{lirt}^e = (1 - \alpha_r) \cdot \sum_s RSI_{sirt}^e \quad \forall i, r, t, e \quad (36)$$

$$INV_{irt}^e \leq \sum_s \left( \sum_{t'=t+1}^{t+LP_r-1} D_{srt'}^e \sum_v X_{lvst}^e \right) \quad \forall i, r, t, e \quad (37)$$

$$INV_{ir(t-1)}^e - (1 - \theta_{ir(t-1)}) INV_{ir(t-1)}^e (1 - M_{irt}^e) (1 - Z_{irt}^e) + Q_{irt}^e > 0 \quad \forall i, r, t, e \quad (38)$$

محدودیت‌های 30 و 31، مقدار محصولی را که به خرده‌فروش  $k$  ارسال می‌شود، باتوجه‌به میزان کمبود مرکز توزیع/جمع‌آوری  $s$  تحت هر سناریو نشان می‌دهد. محدودیت 32 مقدار محصول منقضی‌شده را که از خرده‌فروش  $k$  به مرکز توزیع/جمع‌آوری  $s$  در دوره  $t$  حمل می‌شود، تحت هر سناریو نشان می‌دهد. محدودیت 33 بیان می‌کند که در دوره‌های قبل از طول عمر محصول، هیچ محصولی از خرده‌فروش‌ها به مراکز توزیع/جمع‌آوری ارسال نمی‌شود. محدودیت 34 نشان می‌دهد تحت هر سناریو، محصولات  $i$  که از خرده‌فروش‌ها به مراکز توزیع/جمع‌آوری برگشت داده می‌شوند، به‌طور مستقیماً برای بازرسی از مراکز توزیع/جمع‌آوری به مراکز تولید/بازرسی ارسال می‌شوند. محدودیت‌های 35 و 36 بیانگر این است که پس از بازرسی کیفیت محصولات منقضی‌شده در مرکز تولید/بازرسی، بخشی از آن به مرکز بازیافت و بخش دیگر آن به مرکز دفع تحت هر سناریو ارسال می‌شوند. محدودیت 37 بیانگر حداکثر مقدار موجودی انتهای دوره در مرکز تولید/بازرسی  $i$  باتوجه‌به طول عمر محصول، تحت هر سناریو می‌باشد. محدودیت 38 به این معناست که تحت هر سناریو، مجموع تولید مرکز تولید/بازرسی  $i$  در هر دوره با موجودی انتهای دوره قبل مثبت است.



$$Q_{irt}^e \leq \sum_{b \in B_i} Cappr_{irt}^b \cdot W_i^b \quad \forall i, r, t, e \quad (39)$$

$$\sum_k \sum_r VOL_r \cdot OSK_{skrt}^e \leq \sum_{b \in B_s} Cap_s^b \cdot W_s^b \quad \forall s, e, t \leq 2 \quad (40)$$

$$\sum_k \sum_r VOL_r \cdot (OSK_{skrt}^e + RKS_{ksrt}^e) \leq \sum_{b \in B_s} Cap_s^b \cdot W_s^b \quad \forall s, e, t > 2 \quad (41)$$

$$\sum_i XIN_{int} \cdot OIN_{inrt}^e \leq \sum_{b \in B_n} Cap_n^b \cdot W_n^b \quad \forall n, r, t, e \quad (42)$$

$$\sum_r \sum_l XIL_{ilt} \cdot OIL_{ilrt}^e \leq \sum_{b \in B_l} Cap_l^b \cdot W_l^b \quad \forall l, t, e \quad (43)$$

$$RSI_{sirt}^e \leq \sum_v X_{ivst}^e \cdot BM \quad \forall i, s, r, t, e \quad (44)$$

$$OIN_{inrt}^e \leq XIN_{int} \cdot BM \quad \forall i, n, r, t, e \quad (45)$$

$$OIL_{ilrt}^e \leq XIL_{ilt} \cdot BM \quad \forall i, l, r, t, e \quad (46)$$

$$OSK_{skrt}^e, OIL_{ilrt}^e, OIN_{inrt}^e, RSI_{sirt}^e, RKS_{ksrt}^e, INV_{irt}^e, D_{srt}^e, Q_{irt}^e, \lambda_{srt}^e, AT_{ivst}^e, GT_{ivst}^e, TOC_{it}^e \geq 0 \quad (47)$$

$$W_i^b, W_s^b, W_l^b, W_n^b, XKS_{kst}, XIL_{ilt}, XIN_{int}, X_{ivst}^e, X'_{ivst}^e, X''_{ivst}^e, XSS_{ivs'st}^e, M_{irt}^e, Z_{irt}^e, T'_{irt}^e, T''_{irt}^e \in \{0,1\} \quad (48)$$

محدودیت 39 حداکثر مقدار تولید در هر سناریو را در مرکز تولید / بازرسی  $i$  در دوره  $t$  نشان می‌دهد. محدودیت‌های 40 و 41 نشان می‌دهند که کل ظرفیت اشغال شده به وسیله تمام محصولاتی که در هر سناریو وارد مرکز توزیع / جمع‌آوری می‌شوند، باید کمتر از ظرفیت آن مرکز باشد. محدودیت‌های 42 و 43 بیانگر حداکثر میزان بازیافت و دفع محصولات در هر سناریو می‌باشند. محدودیت‌های 44 تا 46 نشان می‌دهند که اگر دو مرکز در دو سطح متوالی به هم تخصیص پیدا کند، آنگاه محصول بین آنها جابه‌جا می‌شود. محدودیت‌های 47 و 48 نوع متغیرها را مشخص می‌کنند.

#### 4- روش حل

مدل پیشنهادی در این پژوهش، یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط می‌باشد. در بهینه‌سازی چندهدفه به دلیل متعارض بودن یا غیرقابل مقایسه بودن اهداف، نمی‌توان به جوابی دست پیدا کرد که هم‌زمان همه توابع را بهینه کند. بنابراین در این مواقع



به دنبال راه‌حل‌های نامغلوب هستیم که در ادبیات مربوط به آن، این راه‌حل معروف به جواب بهینه پارتو باشد. روش‌های مختلفی برای حل مسائل چندهدفه وجود دارد که نظر تصمیم‌گیرنده را به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم در تصمیم‌گیری داخل می‌کند. در این پژوهش از روش LP متریک استفاده شده است. در این روش، جواب بهینه مدل از حل مدل تک‌هدفه که به دنبال حداقل کردن فاصله هر تابع از مقدار بهینه خود می‌باشد، به دست می‌آید. به منظور جلوگیری از افزایش پیچیدگی مدل،  $p=1$ ، در نظر گرفته شده است و با به دست آوردن مقادیر بهینه هر یک از توابع هدف  $(Z_1^*, Z_2^*, Z_3^*)$ ، تابع هدف LP متریک، براساس رابطه 49 است [23].  $(\sum_{i=1}^3 W_i = 1)$ .

$$MIN Z_{LP-metric} = \left[ W_1 \frac{Z_1 - Z_1^*}{Z_1^*} + W_2 \frac{Z_2 - Z_2^*}{Z_2^*} + W_3 \frac{Z_3 - Z_3^*}{Z_3^*} \right] \quad (49)$$

به دلیل ماهیت پیچیده مدل پیشنهادی و قرارگرفتن آن در گروه مسائل NP-hard، لزوم بهره‌گیری از رویکردهای فراابتکاری را ایجاب می‌کند. از این رو در این مقاله، رویکردی از الگوریتم ژنتیک به منظور حل مدل پیشنهاد شده است.

## 5- نتایج محاسباتی

### 5-1- تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک

نخست یک مقدار اولیه برای نرخ‌های تقاطع، جهش و اندازه گام جهش از روش آزمایش و خطا تعیین شده است. سپس به منظور بهبود سرعت الگوریتم، مقادیر پارامترهای ذکرشده را در طول فرایند حل، یک عدد ثابت در نظر نمی‌گیریم [24]. کنترل روی نرخ‌ها به این روش است که پس از تکرار دهم، اگر در هر سه تکرار متوالی، مقدار تابع برازش بهبود پیدا کند، نرخ‌ها ثابت می‌ماند و اگر بهبودی حاصل نشود، برای نرخ تقاطع، یک عدد تصادفی از تابع توزیع یکنواخت در بازه  $[P_{0c}, 0/9]$  برای نرخ جهش، یک عدد تصادفی از تابع توزیع یکنواخت در بازه  $[P_{0m}, 0/5]$  و برای  $\mu$  و  $\sigma$  یک عدد تصادفی در بازه  $[0/1, 0/9]$  تولید می‌شود و الگوریتم، تکرار بعد را با نرخ‌های جدید انجام می‌دهد. این فرایند تا برقراری شرط توقف ادامه



پیدا می‌کند. نتیجه این رویکرد، دستیابی به جواب‌هایی با کیفیت و تنوع بسیار بالا و همچنین سرعت حل مناسب الگوریتم برای مسائل پیچیده با تعداد متغیرهای بالا می‌باشد. پارامترهای الگوریتم ژنتیک در جدول 2 نشان داده شده است.

جدول 2. مقدار پارامترهای الگوریتم ژنتیک

| پارامتر         | تعریف                          | مقدار                                  |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| MaxIT           | حداکثر تعداد تکرارهای الگوریتم | ابعاد متوسط و بزرگ 500، ابعاد کوچک 300 |
| nPop            | تعداد جمعیت اولیه              | ابعاد متوسط و بزرگ 700، ابعاد کوچک 500 |
| P <sub>0c</sub> | نرخ اولیه تقاطع                | 0/7                                    |
| P <sub>0m</sub> | نرخ اولیه جهش                  | 0/2                                    |
| Mu              | نرخ اولیه جهش برای ژن‌ها       | 0/1                                    |
| Sigma           | اندازه گام اولیه جهش           | 0/1                                    |

## 5-2- حل مسائل اندازه کوچک، متوسط و بزرگ به‌وسیله الگوریتم پیشنهادی

نخست با حل مسائل در اندازه‌های کوچک به‌وسیله نرم‌افزار GAMS با حل‌کننده BARON، امکان‌پذیری و یا شدنی بودن مدل بررسی شده است. سپس به‌منظور آزمودن کارایی الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم در محیط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد و نتایج حاصل از اجرای آن در مثال‌های اندازه کوچک با نتایج حل روش دقیق به‌وسیله نرم‌افزار GAMS، مقایسه شدند. برای تمام محاسبات از یک کامپیوتر شخصی با مشخصات پردازشگر corei5 2.27 GHZ و حافظه داخلی 4GB استفاده شد. در جدول 3 نتایج مربوط به حل مسائل کوچک نشان داده شده است. GAP، درصد اختلاف بین مقدار تابع هدف کل (با رویکرد LP متریک) حاصل از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار GAMS است که به‌صورت رابطه 50 محاسبه می‌شود و در آن  $OF_{GA}$  مقدار تابع هدف حاصل شده از اجرای الگوریتم ژنتیک و  $OF_{GAMS}$  مقدار تابع هدف حاصل شده از حل مدل به‌وسیله نرم‌افزار GAMS می‌باشد.



$$GAP = \frac{OF_{GA} - OF_{GAMS}}{OF_{GAMS}} \times 100 \quad (50)$$

جدول 3. نتایج محاسباتی برای حل مسائل با اندازه کوچک

| GA      |                 |         |            |       |                 | GAMS            |           |          |       |                 | مسئله   |
|---------|-----------------|---------|------------|-------|-----------------|-----------------|-----------|----------|-------|-----------------|---------|
| Gap (%) | زمان حل (ثانیه) | $Z_3$   | $Z_2$      | $Z_1$ | $Z_{LP-metric}$ | زمان حل (ثانیه) | $Z_3$     | $Z_2$    | $Z_1$ | $Z_{LP-metric}$ |         |
| 7/2     | 138/2           | 7986727 | 34980425   | 365/5 | 0/1383          | 190/7           | 7948592   | 34745350 | 357/7 | 0/129           | 1       |
| 4/3     | 192/3           | 9398997 | 37007590/2 | 244/5 | 0/1361          | 687/4           | 7949399/8 | 35011200 | 359/7 | 0/1305          | 2       |
| 4/8     | 319/9           | 7962301 | 33741596   | 122/5 | 0/1459          | 1716/7          | 7946460   | 33655390 | 120/6 | 0/1392          | 3       |
| 7/9     | 478/2           | 9399832 | 35924314   | 80/8  | 0/1472          | 4026            | 9395568/4 | 35651290 | 78    | 0/1364          | 4       |
| 6/1     | 282/15          |         |            |       |                 | 1652/95         |           |          |       |                 | میانگین |

باتوجه به جدول 3، میانگین خطای گزارش شده برای مسائل آزماینده که به وسیله الگوریتم پیشنهادی حل شده‌اند، برابر با 6/1 درصد می‌باشد. همچنین میانگین زمان حل مسائل به وسیله نرم‌افزار گمز و الگوریتم پیشنهادی به ترتیب برابر با 1652/95 و 282/15 ثانیه است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده کارایی الگوریتم حل پیشنهادی از لحاظ زمان و کیفیت جواب‌ها می‌باشد.

از آنجایی که پیچیدگی مسئله بررسی شده باتوجه به تعداد بالای متغیرهای تصمیم بالا است، نرم‌افزار گمز تنها در اندازه‌های کوچک می‌تواند به حل مسائل در زمان قابل قبول بپردازد. بنابراین مثال‌های اندازه متوسط و بزرگ با الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل شده‌اند. در این مقاله از دو شاخص تعداد جواب‌های غیرمغلوب یافت شده (QM<sup>1</sup>) و فاصله (SM<sup>2</sup>) برای ارزیابی کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم پیشنهادی در ابعاد متوسط و بزرگ استفاده شده است [25]. شاخص تعداد حل‌های غیرمغلوب، نشان‌دهنده تعداد آلترناتیوهای است که

1. Quantity Metric  
2. Spacing Metric



می‌توان برای انتخاب به تصمیم‌گیرنده ارائه کرد. درواقع هرچه تعداد این حل‌ها بیشتر باشد، عملکرد الگوریتم بهتر است. شاخص فاصله، میزان یکنواختی نقاط نامغلوب را در فضای حل اندازه‌گیری می‌کند. مقادیر کم این معیار بیانگر توزیع یکنواخت‌تر جواب در پارتوی شناسایی شده است. جدول 4 نتایج محاسباتی الگوریتم پیشنهادی را در این دو شاخص، برای تکرارهای 100، 200 و 500 نشان می‌دهد.

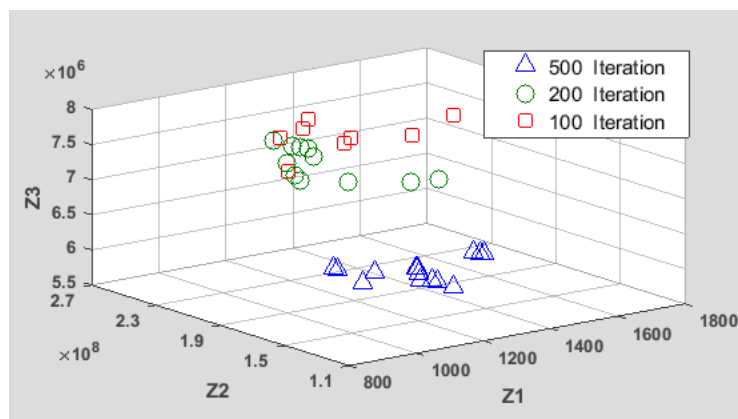
جدول 4. نتایج محاسباتی الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ

| مسئله   | 100 تکرار       |       |         | 200 تکرار       |       |         | 500 تکرار       |       |         |
|---------|-----------------|-------|---------|-----------------|-------|---------|-----------------|-------|---------|
|         | زمان حل (ثانیه) | SM    | QM      | زمان حل (ثانیه) | SM    | QM      | زمان حل (ثانیه) | SM    | QM      |
| 5       | 13              | 0/69  | 470/9   | 14              | 0/52  | 721/4   | 16              | 0/362 | 1314/8  |
| 6       | 8               | 0/76  | 653/87  | 11              | 0/61  | 1145/2  | 15              | 0/343 | 2984/96 |
| 7       | 10              | 0/615 | 924/2   | 14              | 0/403 | 1671/16 | 18              | 0/518 | 4583/29 |
| 8       | 15              | 0/611 | 1299/14 | 16              | 0/482 | 2267/42 | 14              | 0/413 | 7213/4  |
| 9       | 15              | 0/91  | 2031/15 | 13              | 0/67  | 4141/31 | 17              | 0/512 | 10901/2 |
| 10      | 21              | 0/39  | 3227    | 23              | 0/23  | 5717    | 22              | 0/224 | 14116   |
| میانگین | 13/6            | 0/662 | 1434/37 | 15/2            | 0/485 | 2610/58 | 17              | 0/395 | 6852/27 |

باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده در جدول 4، میانگین تعداد جواب‌های نامغلوب کسب شده به‌وسیله الگوریتم، از 13/6 به 15/2 و 17 به‌ترتیب در تکرارهای 100، 200 و 500 افزایش پیدا کرده است. باتوجه به شاخص فاصله نیز با افزایش تکرارها، جواب‌های پارتوی به‌دست‌آمده به‌وسیله الگوریتم توزیع یکنواخت‌تری دارد، به‌طوری که میانگین کلی این شاخص برای 500 تکرار برابر 0/395 می‌باشد که نسبت به تکرارهای 200 و 100 بهتر عمل کرده است. همچنین زمان حل الگوریتم برای مسائل نمونه قابل‌قبول است. بیشترین زمان حل، مربوط به مسئله 10



با 14116 ثانیه برای 500 تکرار است. شکل 3، نمودار جواب‌های پارتویی حاصل از حل مسئله 6 را در تکرارهای 100، 200 و 500 نشان می‌دهد.



شکل 3. جواب‌های پارتو حاصل از حل مسئله 6 در تکرارهای 100، 200 و 500

## 6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، صورت جدیدی از مسأله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در یک شبکه زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس چندسطحی شامل مراکز ترکیبی تولید/بازرسی، مراکز ترکیبی توزیع/جمع‌آوری، خرده‌فروش‌ها و مراکز دفع و بازیافت با جریان‌های رفت‌وبرگشت مربوط به محصولات با طول عمر کوتاه، در حالت چنددوره‌ای، چندمحصولی و تسهیلات با ظرفیت محدود مطالعه شده است. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده، الگوی پیشنهادی به‌طور هم‌زمان، تعداد و مکان بهینه استقرار مراکز و سطوح ظرفیت آنها، چگونگی تخصیص مراکز در سطوح متوالی، مسیر مناسب از مراکز تولید/بازرسی به مراکز توزیع/جمع‌آوری، زمان رسیدن و عزیمت وسیله نقلیه در مراکز توزیع/جمع‌آوری، مقدار تولید، ذخیره موجودی یا کمبود در هر مرکز تولید/بازرسی تأسیس‌شده و مقدار جریان بهینه در هر دوره را بین همه تسهیلاتی که در کل شبکه با هم مرتبطند، با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های سیستم، مجموع حداکثر



زمان در زنجیره و انتشار آلاینده‌ها در کل شبکه تعیین می‌کند. بنابراین می‌توان گفت تصمیم‌های مکان‌یابی - تخصیص، مسیریابی و موجودی در زنجیره تأمین بسیار به هم وابسته بوده‌اند و تعیین مقادیر بهینه این متغیرها در تعامل با هم است که می‌تواند منجر به یافتن یک سیستم بهینه زنجیره‌تأمین با حداقل هزینه‌های ممکن و افزایش سطح خدمت‌دهی به مشتریان شود، زیرا بررسی هم‌زمان این سه تصمیم، منجر به یک دیدگاه سیستمی به کل زنجیره تأمین به‌عنوان یک واحد پیوسته می‌شود و از بهینگی موضعی جلوگیری می‌کند. تابع هدف کمینه‌سازی زمان حمل در کل زنجیره، تأثیر به‌سزایی در تأمین به موقع تقاضا و کاهش افت کیفیت محصولات فاسدشدنی دارد، به‌طوری که هرچه مقدار آن برای کالا کمتر باشد، ارزش افزوده محسوب می‌شود که با دستیابی به آن می‌توان سود رقابتی بلندمدت و کوتاه‌مدت را در بازار به‌دست آورد. همچنین باتوجه‌به تأثیر تابع هدف مربوط به آلاینده‌های زیست‌محیطی در تصمیم‌های استراتژیک و به‌خصوص عملیاتی مانند مسیریابی، استفاده از این رویکرد به غیر از رعایت الزام‌های قانونی می‌تواند باعث صرفه‌جویی ملموسی در زنجیره‌های تأمین شود که برای جلوگیری از جریمه‌های بعدی (پرداخت مالیات بر کربن) به مدیران پیشنهاد می‌شود.

علاوه‌براین برای تطبیق هر چه بیشتر مسئله با دنیای واقعی، پارامترهای تقاضا و نرخ برگشت محصولات غیرقطعی در نظر گرفته شدند. درنظرگرفتن شرایط عدم قطعیت، تا حد بسیار زیادی نتایج حاصله را قابل اطمینان‌تر کرده و به مدیران تصمیم‌گیرنده، دید بهتر و واقعی‌تری در برآورد هزینه‌ها و شرایط آینده خواهد داد. همچنین باتوجه‌به آنکه پیچیدگی مسئله از نوع NP-hard است، برای حل مسائل با اندازه واقعی در ابعاد متوسط و بزرگ، الگوریتم ژنتیک چندهدفه ارائه شد. سپس به‌منظور اعتبارسنجی، نتایج حاصل از حل مسئله مذکور در ابعاد کوچک به‌وسیله الگوریتم پیشنهادی با نتایج حل به‌وسیله نرم‌افزار GAMS از نظر کیفیت جواب و زمان محاسبه مقایسه شد. همچنین به‌منظور ارزیابی جواب‌های حاصل از الگوریتم ژنتیک در ابعاد متوسط و بزرگ، از دو شاخص تعداد جواب‌های نامغلوب یافت‌شده و فاصله استفاده شد. نتایج محاسباتی، کارایی الگوی ارائه‌شده و روش حل پیشنهادی را نشان می‌دهد. محدودیت‌های زیر را می‌توان به‌منظور انطباق هر چه بیشتر مسئله با مسائل دنیای واقعی در پژوهش‌های آینده در نظر گرفت: 1- لحاظ‌کردن سیاست‌های تخفیفی در بخش



فروش محصول و ترکیب آن با دیدگاه‌های بازاریابی، ازجمله فروش محصولات جایگزین شده هم‌خانواده با تخفیف به جای محصولات با کمبود، زیرا که از دیدگاه زنجیره تأمین این مسئله، یک امر هزینه‌زا است ولی از دیدگاه بازاریابی یکی از مهم‌ترین عوامل برای به دست آوردن رضایت مشتریان در مواجهه با کمبود است؛ 2- در نظر گرفتن محصولات با تنوع بیشتر مانند بستنی که به جهت فرایندی متفاوت با خانواده شیر می‌باشند، این محصولات شرایط مختلف حمل و نگهداری را نیاز دارند و همچنین دو نوع انبار یکی بالای صفر و دیگری زیر صفر را باید وارد الگو کرد؛ 3- در نظر گرفتن تصمیم‌های مربوط به قیمت‌گذاری کالاهای بازیافت‌شده برای ارائه به بازار دوم؛ 4- در نظر گرفتن سایر پارامترهای غیرقطعی ازجمله هزینه‌ها و فواصل بین مکان‌ها مدل را واقعی‌تر کرده در نتیجه استفاده از روشی غیر از مبتنی بر سناریو را الزامی می‌کند.

## 7- منابع

- [1] Melo M.T., Nickel S., Saldanha-da-Gama, F. "Facility location and supply chain management—a review"; *European Journal of Operational Research*, 196, 2009, 401–412.
- [2] Diabat A., Al-Salem M. "An integrated supply chain problem with environmental considerations"; *International Journal of Production Economics*, 164, 2015, 330–338.
- [3] Mardan E., Govindan K., Mina H., Gholami-Zanjani S.M. "An accelerated benders decomposition algorithm for a bi-objective green closed loop supply chain network design problem"; *Journal of Cleaner Production*, 235, 2019, 1499-1514.
- [4] Pishvae M.S., Razmi J. "Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming"; *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), 2012, 3433-3446.
- [5] Diabat A., Theodorou E. "A location–inventory supply chain problem: Reformulation and piecewise linearization"; *Computers & Industrial Engineering*, 90, 2015, 381-389.
- [6] Govindan K., Jafarian A., Khodaverdi R., Devika, K. "Two-echelon multiple vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food"; *International Journal of Production Economics*, 152, 2014, 9-28.



- [7] Ahmadi Javid, A., Seddighi, A.H. "A location-routing-inventory model for designing multisource distribution networks". *Engineering Optimization*, 44(6), 2012, 637-656.
- [8] Li R., Lan H., Mawhinney J. "A review on deteriorating inventory study";. *Service Science & Management*, 3, 2010, 117-129.
- [9] Yang X., Ma H., Zhang D. "Research into ILRIP for Logistics Distribution Network of Deteriorating Item Based on JITD"; *Information Computing and Applications*, 105, 2010, 152-160.
- [10] کولیائی م.، آذر ع. رجب‌زاده قطری ع. «پیکره‌بندی مدل ریاضی دو مرحله‌ای برای مدیریت زنجیره تأمین سبز»، پژوهش‌های مدیریت منابع سازمانی، 8 (4)، 1395، 111-130.

- [11] Tiwari A., Chang P., Tiwari M. K., Kandhway R. "A Hybrid Territory Defined evolutionary algorithm approach for closed loop green supply chain network design"; *Computers & Industrial Engineering*, 99, 2016, 432-447.
- [12] Ahmadi Javid A., Azad N. "Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design"; *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 2010, 582-597.
- [13] Sajjadi S. R., Cheraghi S.H. "Multi-products location-routing problem integrated with inventory under stochastic demand"; *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 7(4), 2011, 454-476.
- [14] Nekooghadi N., Tavakkoli-Moghaddam R., Ghezavati V.R., Javanmard Sh. "Solving a new bi-objective location-routing-inventory problem in a distribution network by meta-heuristics"; *Computers & Industrial Engineering*, 76, 2014, 204-221.
- [15] Liu B., Chen H., Li Y., Liu X. "A Pseudo-parallel genetic algorithm integrating simulated annealing for stochastic location-inventory-routing problem with consideration of returns in E-Commerce"; *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 215, 2015, 1-15.
- [16] Ghorbani A., Akbari Jokar M.R. "A hybrid imperialist competitive-simulated annealing algorithm for a multi-source multi-product location-routing-inventory problem", *Computers & Industrial Engineering*, 101, 2016, 116-127.
- [17] Zhalechian M., Tavakkoli-Moghaddam R., Zahiri B., Mohammadi M. "Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty"; *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 2016, 182-214.



- [18] Hiassat A., Diabat A., Rahwan I. "A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products"; *Journal of Manufacturing Systems*, 42, 2017, 93-103.
- [19] Saragih N.I., Nur-Bahagia S., Syabri I. "A Heuristic Method for Location-inventory-routing Problem"; In A Three-Echelon Supply Chain System, *Computers & Industrial Engineering*, 127, 2018, 875-886.
- [20] Rafie-Majd Z., Pasandideh S.H., Naderi B. "Modelling and solving the integrated inventory-location-routing problem in a multi-period and multi-perishable Product Supply Chain with Uncertainty: Lagrangian Relaxation Algorithm"; *Computers & Chemical Engineering*, 109, 2018, 9-22.
- [21] Karakostas P., Sifaleras A., Georgiadis M. "A general variable neighborhood search-based solution approach for the location-inventory-routing problem with distribution outsourcing"; *Computers & Chemical Engineering*, 126, 2019, 263-279.
- [22] Mousavi S.M., Alikar N., Akhavan Niaki S.T., Bahreininejad A. "Optimizing a location allocation-inventory problem in a two-echelon supply chain network: A modified Fruit Fly optimization algorithm", *Computers & Industrial Engineering*, 87, 2015, 543-560.
- [23] Sadeghi Rad R., Nahavandi N. "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, 2018, 1549-1565.
- [24] حاجیان س.، افشارکاظمی م.، سید حسینی س.م.، طلوعی اشلقی ع. «ارائه مدل چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز چند دوره‌ای و چند محصولی برای کالاهای فاسدشدنی»، فصل‌نامه مدیریت صنعتی، 11(1)، 1398، 83-110.
- [25] Dabiri N., Tarokh M.J., Alinaghian M. "A new mathematical model for bi-objective inventory routing problem with step cost function: A MOPSO solution approach", *Applied Mathematical Modelling*, 49, 2017, 302-318.