

## طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته کامل تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا و بازگشت محصولات

محمدرضا اکبری جوکار<sup>۱\*</sup>، موسی الرضا ابوچناری<sup>۲</sup>، حسین عاکفی<sup>۲</sup>

۱. استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۱۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰، تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۰۹/۱۳)

### چکیده

در این پژوهش، زنجیره تأمین حلقه بسته کامل بررسی شده است. با توجه به اینکه زنجیره تأمین حلقه بسته کامل شامل زنجیره تأمین رو به جلو و رو به عقب است، در این پژوهش شبکه‌ای شامل تأمین‌کنندگان، کارخانه‌های تولیدی، توزیع‌کنندگان، مشتریان، مراکز جمع‌آوری و مراکز انهدام بررسی شده است. همچنین، از تکنیک سناریوسازی به منظور بررسی عدم قطعیت مقدار تقاضا و مقدار بازگشت محصولات از مشتریان استفاده شده است. استفاده از تکنیک سناریوسازی موجب شده است مدل پیشنهادی هرچه بیشتر با مدل‌های موجود در دنیای واقعی تطابق داشته باشد. در این پژوهش، مسئله مورد بررسی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با هدف کاهش هزینه‌های کل زنجیره تأمین مدل‌سازی شده است. محل قرارگیری تسهیلات، میزان تولید هر یک از محصولات در مراکز تولیدی و میزان کالای مبادله‌شده بین اجزای مختلف زنجیره تأمین متغیرهای تصمیم مدل ارائه شده هستند. با توجه به پیچیدگی محاسباتی مدل، یک الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات به منظور حل مسئله در اندازه‌های بزرگ توسعه داده شده است. نتایج نشان‌دهنده کارایی مدل ارائه‌شده در شرایط عدم قطعیت است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، زنجیره تأمین حلقه بسته، عدم قطعیت.

### مقدمه

بررسی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت اهمیت فراوانی دارد. عرضه و تقاضا دو منبع مهم این عدم قطعیت هستند. اشتباهات و تأخیر تأمین‌کنندگان در تحویل به موقع مواد اولیه و نیز نوسانات ناخواسته موجود در تقاضاها موجب ایجاد این عدم قطعیت در عرضه و تقاضا می‌شود. برگشت نامشخص نیز از ابهامات مهم در لجستیک معکوس است.

در این پژوهش، یک مدل حلقه بسته کامل مبتنی بر سناریوسازی ارائه شده است. در این مدل، شبکه‌ای شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مشتریان، مراکز جمع‌آوری و انهدام به صورت اثربخشی طراحی می‌شود. تابع هدف این مسئله شامل کاهش هزینه‌های ثابت ایجاد تسهیلات، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود. همچنین، برای حل این مسئله در اندازه‌های بزرگ یک الگوریتم فرا ابتکاری توسعه داده شده است.

مسائل مدیریت زنجیره تأمین (SCM) از جمله مسائلی هستند که توجه فراوانی را به خود جلب کرده‌اند. زنجیره‌های تأمین را می‌توان به دو دسته زنجیره‌های تأمین رو به جلو (FSC) و رو به عقب (FSC) تقسیم کرد. زنجیره تأمین رو به جلو شامل مجموعه‌هایی از فعالیت‌ها به منظور تبدیل مواد خام به محصولات نهایی می‌شود. در این زنجیره‌ها، موضوعاتی همچون مدیریت تقاضا، تدارکات و اجرای سفارش اهمیت دارد. زنجیره تأمین معکوس فعالیت‌های جمع‌آوری و بهبود بازده محصول در SCM تعریف می‌شود.

به ادغام زنجیره تأمین رو به جلو و رو به عقب، زنجیره تأمین حلقه بسته (CLSC) گفته می‌شود. در این زنجیره‌ها موضوعاتی مانند مکان‌یابی تسهیلات، تخصیص کالا به مشتریان، سیستم‌های حمل‌ونقل، مسائل زیست‌محیطی و... بررسی می‌شوند.

به‌این ترتیب، در بخش بعد ادبیات موضوع مرور می‌شود. سپس شبکه و مدل ریاضی و فرضیات آن را تشریح می‌شود. در ادامه، الگوریتم حل و ساختارهای بردار جواب بررسی می‌شود. سپس بررسی داده‌ها و چگونگی تنظیم پارامتر کردن الگوریتم حل پیشنهادی از طریق روش ناگوچی صورت می‌گیرد. در پایان نیز یافته‌ها و نتایج پژوهش و پیشنهادها آتی مطرح می‌شود.

## مرور ادبیات

در این قسمت، پژوهش‌های موجود در حوزه زنجیره تأمین حلقه بسته بررسی می‌شوند. در شبکه‌های زنجیره تأمین سنتی جریان مستقیم به مکان‌یابی، تعیین ظرفیت، تعداد تسهیلات تولید، توزیع و ارتباطات حمل‌ونقلی پرداخته می‌شود [۱]. در شبکه‌های یکپارچه مستقیم و معکوس تسهیلات دیگری از جمله مراکز جمع‌آوری، مرتب‌سازی، بازیابی مجدد به شبکه اضافه و بررسی می‌شوند [۲]. در نتیجه، باید طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته به صورت یکپارچه و کامل و مطابق واقعیت انجام گیرد که خود موجب پیچیده‌تر شدن طراحی شبکه زنجیره تأمین می‌شود. یکی از موضوعات مهم در طراحی شبکه زنجیره تأمین، مکان‌یابی و تخصیص جریان موجود در زنجیره تأمین است. مکان‌یابی گسسته بدین صورت انجام می‌گیرد که تعداد محدودی مکان وجود دارد که می‌توان تسهیلات را در آن مستقر کرد. استقرار  $p$  تسهیل جدید، به گونه‌ای که مجموع فواصل یا هزینه‌های تأمین تقاضا بهینه شود، جزء ساده‌ترین مسائل مکان‌یابی است [۳]. در پیشینه مسائل مکان‌یابی، این مسائل بدون در نظر گرفتن ظرفیت تسهیلات، هر مشتری به گونه‌ای به تسهیلات تخصیص می‌یابد که مجموع هزینه‌ها کمینه شود [۴]. در ادامه، ملکات و دسکین یک مدل مکان‌یابی تسهیلات به صورت تک‌دوره‌ای و با ظرفیت محدود هریک از تسهیلات ارائه دادند [۵]. سعید یعقوبی و همکاران یک مسئله مکان‌یابی تسهیلات سیستم‌های توزیع در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی را بررسی کردند و برای حل آن یک مدل ریاضی دومرحله‌ای ارائه دادند [۶]. آمبروزینو و اکیو تلا با توسعه یک مدل پویا مسئله مکان‌یابی را در شرایط چنددوره‌ای و با ظرفیت محدود برای یک شبکه زنجیره تأمین چهارلایه‌ای ارائه

دادند [۷]. همچنین، تان و همکاران پارامترهای تأثیرگذار دیگری همچون تقاضا، قیمت، هزینه‌های راه‌اندازی تسهیلات و حمل‌ونقل را در دوره‌های مختلف در مسئله مکان‌یابی لحاظ کردند و یک مدل پویا ارائه دادند [۸]. لو و همکاران یک مدل مکان‌یابی - تخصیص برای جمع‌آوری، دوباره‌کاری و بازتولید فرش با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری، عملیاتی و حمل‌ونقل توسعه دادند [۹]. مسئله مکان‌یابی در لجستیک معکوس هم اهمیت داشته است، به گونه‌ای که لو و بوستل یک شبکه سه‌لایه‌ای شبکه زنجیره تأمین معکوس را طراحی کردند که در آن علاوه بر مکان‌یابی تسهیلات، جایابی مراکز جمع‌آوری و بازسازی نیز در نظر گرفتند [۱۰]. پیشوایی و شکوری یک مدل لجستیک معکوس به منظور کمینه‌کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و احداث تسهیلات ارائه دادند تا از این طریق با مکان‌یابی مناسب جریان برگشتی شبکه را بهینه کنند [۱۱].

شبکه زنجیره تأمین ممکن است از لایه‌های مختلفی مانند تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مشتریان و خرده‌فروشان تشکیل شده باشد [۱۲]؛ برای مثال، ملو و داگاما یک شبکه زنجیره تأمین طراحی کردند که در آن به دنبال مکان‌یابی مناسب برای تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان هستند. فلیشمن و همکاران یک مدل لجستیک رو به جلو را به منظور حل مدل لجستیک معکوس توسعه دادند [۱۳]. جایارامان و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای تعیین مقادیر بهینه بازتولید و احیای محصولات مختلف در یک شبکه لجستیک معکوس ارائه کردند [۱۴]. افلیسچمن و همکاران یک شبکه لجستیک معکوس که در آن محدودیت‌های عملیاتی جریان‌های روبه‌جلو و برگشتی در نظر گرفته نشده بود، طراحی کردند [۱۵]. سورینگ چکیده‌ای از روش‌های مدل‌سازی شبکه‌های زنجیره تأمین را گردآوری کرده و مدل‌های کمی زنجیره تأمین رو به جلو را تحلیل و جمع‌بندی کرده است [۱۶]. همچنین، در جمع‌بندی این حوزه از زنجیره تأمین مینر مدل‌های موجودی با حالت‌های مختلف تأمین‌کنندگان و نقش آن‌ها در زنجیره تأمین را بررسی کرده است. وی همچنین مسائل

از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی استفاده کردند و به دلیل غیرقطعی بودن مدل، از روش بهینه‌سازی استوار تحت سناریو استفاده کردند [۲۶]. براساس پیشینه تحقیق، در هیچ‌یک از پژوهش‌های ذکر شده، زنجیره تأمین حلقه بسته به صورت کامل و یکپارچه به ویژه در بخش بازگشتی و ارائه یک برنامه‌ریزی مناسب و یکپارچه بررسی نشده است. این مسئله در جدول ۱ که شکاف تحقیقاتی را در این حوزه بررسی کرده است، نشان داده می‌شود [۲۷]. از این رو، در پژوهش حاضر زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن تأمین‌کنندگان، کارخانه‌های تولیدی، توزیع‌کنندگان، مشتریان، مراکز جمع‌آوری و انهدام بررسی شده است و همچنین، با استفاده از تکنیک سناریوسازی عدم قطعیت موجود در تقاضا و بازگشت محصولات مدل شده‌اند. در پایان، برخلاف پژوهش‌های مشابه قبلی که فقط مسائل با اندازه کوچک را بررسی کرده است، یک الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات برای حل مسائل با اندازه بزرگ توسعه داده شده است.

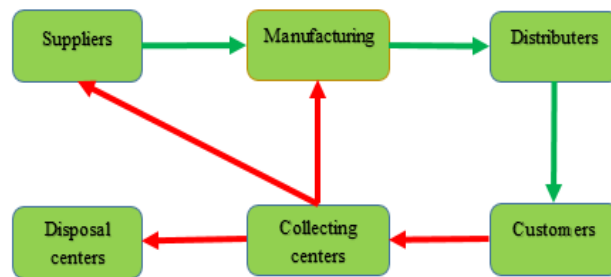
### شرح شبکه

در شکل ۱، یک شبکه چند کالایی یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس به تصویر کشیده می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، در لجستیک مستقیم، مواد اولیه به منظور به کارگیری در فرایند تولید از سوی تأمین‌کنندگان به مراکز تولید و احیا ارسال می‌شوند. سپس کالای تولید شده از مراکز تولید به مراکز توزیع و از آنجا به مشتریان منتقل می‌شود. در جریان معکوس، محصولات برگشتی پس از جمع‌آوری و بازرسی به سه گروه محصولات قابل احیا، قراضه و نیز محصولات نیازمند به بازسازی تقسیم می‌شوند. محصولات قابل احیا به مراکز تولید و احیا حمل می‌شوند و عملیات ساخت مجدد روی آن‌ها صورت می‌گیرد. محصولات قراضه به مراکز انهدام حمل و سپس معدوم می‌شوند و در نهایت محصولات بازگشتی که به بازسازی نیاز دارند به مراکز تأمین‌کنندگان منتقل می‌شوند تا عملیات جداسازی روی آن‌ها انجام گیرد و قطعات قابل استفاده آن‌ها در اختیار مراکز تولید قرار گیرد تا مجدداً از طریق جریان مستقیم وارد جریان تولید شوند.

مربوط به موجودی را در زنجیره‌های تأمین معکوس و سیستم‌های چندلایه را در تحقیق خود تحلیل کرده است [۱۷].

مدیریت زنجیره تأمین در شرایط عدم قطعیت موضوع مهم دیگری است که محققان این حوزه به آن توجه کرده‌اند. سالما و همکاران با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و نرخ بازگشت، یک شبکه لجستیک چندمحصولی را توسعه دادند [۱۸]. جوجیادیس و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی خطی را برای مدیریت یک شبکه زنجیره تأمین چهارلایه‌ای و چنددوره‌ای که در آن تقاضا در دوره‌های زمانی مختلف به صورت غیرقطعی است، توسعه دادند [۱۹]. پیشوایی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی پایستار به منظور مدل کردن شرایط عدم قطعیت در زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه دادند [۲۰]. سامان حسن‌زاده و همکارش یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای زنجیره تأمین حلقه بسته تولیدکنندگان، جداسازی قطعات، نوسازی و تعیین محل دفع ارائه کرده‌اند [۲۱]. همچنین، آن‌ها یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای یک زنجیره تأمین حلقه بسته که فقط کارخانه‌ها، مشتریان، مراکز جمع‌آوری و انهدام را تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا و برگشت در نظر گرفته بودند، ارائه دادند [۲۲].

برای حل مسائل غیرقطعی سه رویکرد کلی برنامه‌ریزی احتمالی، برنامه‌ریزی فازی و برنامه‌ریزی پویای احتمالی وجود دارد. در اواسط دهه ۱۹۵۰، برنامه‌ریزی احتمالی رویکردی مناسب برای حل مدل‌های غیرقطعی شناخته می‌شد [۲۳]. ال‌ساید و همکاران یک مدل تصادفی برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین یکپارچه چندلایه و چنددوره‌ای با هدف ماکزیم کردن سود کل زنجیره توسعه دادند و برای حل آن یک برنامه خطی مختلط تصادفی چند مرحله ارائه دادند [۲۴]. ژانگ و زو یک شبکه زنجیره تأمین با تقاضای غیرقطعی طراحی کردند و برای حل آن از یک مدل دوسطحی مختلط عدد صحیح استفاده کردند [۲۵]. یوسفی و شیشه‌بری یک شبکه زنجیره تأمین یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس در شرایط عدم قطعیت توسعه دادند. آن‌ها برای مدل‌سازی شبکه ارائه شده



شکل ۱. شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته کامل

### تصمیمات اتخاذ شده

- با حل مدل ارائه شده سه تصمیم زیر اتخاذ می‌شود:
- مکان‌یابی هر یک از تسهیلات از مجموعه مکان‌های بالقوه موجود به منظور احداث آن‌ها؛
  - مقدار تولید هر یک از محصولات در هر یک از مراکز تولید؛
  - مقدار محصول ارسالی بین هر یک از اجزای شبکه.

### مدل و فرضیات آن

در این قسمت فرضیات، مدل‌سازی ریاضی، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل ارائه می‌شود.

### فرضیات

- مدل ارائه شده تک‌دوره‌ای است.
- همه محصولات بازگشتی از بازار به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شوند.
- موقعیت مکانی هر یک از مشتریان ثابت فرض شده است.
- موقعیت مکانی تأمین‌کنندگان نیز ثابت است.

جدول ۱. مقایسه و بررسی شکاف تحقیقاتی در حوزه مورد بررسی

رویکرد بازگشتی			روش حل		ریسک	شبکه			تابع هدف	مقالات	
انهدام	تعمیر	بازیافت	فرا ابتکاری	روش‌های دقیق	عدم قطعیت	چند دوره‌ای	تک دوره‌ای	چند محصولی	هزینه	سال	نویسنده
		✓		✓	✓		✓	✓	✓	۲۰۱۴	Tseng et al.
		✓		✓	✓	✓		✓	✓	۲۰۱۴	Ramezani et al.
	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	۲۰۱۴	J. Zeballos
	✓	✓		✓			✓	✓	✓	۲۰۱۳	Qiang
		✓		✓	✓		✓	✓	✓	۲۰۱۳	Hassanzadeh and Zhang
✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		Our study

### مجموعه‌ها

- $P$ : مجموعه محصولات تولیدی  
 $V$ : مجموعه مکان‌های ثابت تأمین‌کنندگان  
 $I$ : مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز تولید و احیا  
 $J$ : مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز توزیع  
 $K$ : مجموعه مکان‌های ثابت مشتریان  
 $L$ : مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز جمع‌آوری و بازرسی  
 $M$ : مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز انهدام  
 $U$ : مجموعه سناریوها

پارامترها		
$d_{kpu}$ : تقاضای مشتری مرکز $k$ ام برای محصول $p$ ام در سناریوی $u$ ام	$CAR_{ip}$ : ظرفیت احیای کارخانه $i$ ام برای محصول $p$ ام	
$RK_{pu}$ : متوسط نرخ بازگشت محصول $p$ ام که در سناریو $u$ ام توسط مشتریان برگشت داده می‌شود.	$CAS_{vp}$ : ظرفیت بازسازی تأمین‌کننده $v$ ام برای محصول $p$ ام	
$P_u$ : احتمال رخ دادن سناریوی $u$ ام	$FX_i$ : هزینه ثابت ایجاد کارخانه $i$ ام	
$pc_{ip}$ : هزینه هر واحد تولید محصول $p$ ام در کارخانه $i$ ام	$FY_j$ : هزینه ثابت ایجاد مرکز توزیع $j$ ام	
$OC_{jp}$ : هزینه هر واحد عملیاتی محصول $p$ ام در مرکز توزیع $j$ ام	$FZ_l$ : هزینه ثابت ایجاد مرکز جمع‌آوری $l$ ام	
$IC_{lp}$ : هزینه هر واحد بازرسی محصول $p$ ام در مرکز جمع‌آوری و بازرسی $l$ ام	$FU_m$ : هزینه ثابت ایجاد مرکز انهدام $m$ ام	
$RM_{Cip}$ : هزینه هر واحد بازتولید محصول $p$ ام در کارخانه $i$ ام	$RK_{pu}$ : متوسط نرخ بازگشت محصول $p$ ام در سناریوی $u$ ام که توسط مشتریان بازگشت داده می‌شود	
$RSC_{vp}$ : هزینه هر واحد بازسازی محصول $p$ ام در مرکز تأمین‌کننده $v$ ام	$RI_p$ : نرخ بازتولید محصول $p$ ام	
$DC_{mp}$ : هزینه هر واحد انهدام محصول $p$ ام در مرکز انهدام $m$ ام	$RV_p$ : نرخ بازسازی محصول $p$ ام	
$CVI_{vip}$ : هزینه هر واحد حمل‌ونقل محصول $p$ ام برای انتقال از تأمین‌کننده $v$ ام در کارخانه $i$ ام	$RM_p$ : نرخ انهدام محصول $p$ ام	
$CI_{ijp}$ : هزینه هر واحد حمل‌ونقل محصول $p$ ام از کارخانه $i$ ام به مرکز توزیع $j$ ام	<b>متغیرهای تصمیم پیوسته</b>	
$CJK_{jkp}$ : هزینه هر واحد حمل‌ونقل محصول $p$ ام از مرکز توزیع $j$ ام به مرکز مشتری $k$ ام	$QVI_{vipu}$ : مقدار محصول $p$ ام که در کارخانه $i$ ام با استفاده از مواد اولیه تأمین‌کننده $v$ ام در سناریوی $u$ ام تولید می‌شود.	
$CKL_{klp}$ : هزینه هر واحد حمل‌ونقل محصول $p$ ام از مرکز مشتری $k$ ام به مرکز جمع‌آوری $l$ ام	$QIJ_{ijpu}$ : مقدار محصول $p$ ام که از کارخانه $i$ ام به مرکز توزیع $j$ ام در سناریوی $u$ ام فرستاده می‌شود.	
$CLM_{lmp}$ : هزینه هر واحد حمل‌ونقل محصول $p$ ام از مرکز جمع‌آوری $l$ ام به مرکز انهدام $m$ ام	$QJK_{jkpu}$ : مقدار محصول $p$ ام که از مرکز توزیع $j$ ام به مشتری $k$ ام در سناریو $u$ ام فرستاده می‌شود.	
$CLL_{lip}$ : هزینه هر واحد حمل‌ونقل محصول $p$ ام از مرکز جمع‌آوری $l$ ام به کارخانه $i$ ام	$QKL_{klpu}$ : مقدار محصول $p$ ام که از مشتری $k$ ام به مرکز جمع‌آوری $l$ ام در سناریوی $u$ ام فرستاده می‌شود.	
$CLV_{lvp}$ : هزینه هر واحد حمل‌ونقل محصول $p$ ام از مرکز جمع‌آوری $l$ ام به تأمین‌کننده $v$ ام	$QLI_{lipu}$ : مقدار محصول $p$ ام که از مرکز جمع‌آوری $l$ ام به کارخانه $i$ ام در سناریوی $u$ ام فرستاده می‌شود.	
$CAI_{ip}$ : ظرفیت تولید کارخانه $i$ ام برای محصول $p$ ام	$QLV_{lvpu}$ : مقدار محصول $p$ ام که از مرکز جمع‌آوری $l$ ام به تأمین‌کننده $v$ ام در سناریوی $u$ ام فرستاده می‌شود.	
$CAJ_{jp}$ : ظرفیت مرکز توزیع $j$ ام برای محصول $p$ ام	$QLM_{lmpu}$ : مقدار محصول $p$ ام که از مرکز جمع‌آوری $l$ ام به مرکز انهدام $m$ ام در سناریوی $u$ ام فرستاده می‌شود.	
$CAL_{lp}$ : ظرفیت مرکز جمع‌آوری $l$ ام برای محصول $p$ ام	<b>متغیرهای تصمیم گسسته صفر و یک</b>	
$CAM_{mp}$ : ظرفیت مرکز انهدام $m$ ام برای محصول $p$ ام	$X_i$ : اگر کارخانه $i$ تأسیس شود، مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است.	

$$\begin{aligned}
 & + \sum_u \sum_k \sum_l \sum_p CKL_{klp} * QKL_{klpu} * P_u \\
 & + \sum_u \sum_l \sum_i \sum_p CLI_{lip} \\
 & * QLI_{lipu} * P_u \\
 & + \sum_u \sum_l \sum_v \sum_p CLV_{lvpu} \\
 & * QLV_{lvpu} * P_u \\
 & + \sum_u \sum_l \sum_m \sum_p CLM_{lmpu} \\
 & * QLM_{lmpu} * P_u
 \end{aligned}$$

$Y_j$ : اگر مرکز توزیع  $j$  تأسیس شود، مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است.  
 $U_m$ : اگر مرکز انهدام  $m$  تأسیس شود، مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است.  
 $Z_l$ : اگر مرکز جمع‌آوری  $l$  تأسیس شود، مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است.

### مدل‌سازی

(۱)

$$\begin{aligned}
 \min Z = & \sum_i FX_i * X_i \\
 & + \sum_j FY_j * Y_j \\
 & + \sum_l FZ_l * Z_l \\
 & + \sum_m FU_m * U_m \\
 & + \sum_u \sum_v \sum_i \sum_p PC_{ip} \\
 & * QVI_{vipu} * P_u \\
 & + \sum_u \sum_i \sum_j \sum_p OC_{jip} \\
 & * QIJ_{ijpu} * P_u \\
 & + \sum_u \sum_k \sum_l \sum_p IC_{lpu} \\
 & * QKL_{klpu} * P_u \\
 & + \sum_u \sum_l \sum_i \sum_p RMC_{ip} \\
 & * QLI_{lipu} * P_u \\
 & + \sum_u \sum_l \sum_v \sum_p RSC_{vpu} \\
 & * QLV_{lvpu} * P_u \\
 & + \sum_u \sum_l \sum_m \sum_p DC_{mp} \\
 & * QLM_{lmpu} * P_u \\
 & + \sum_u \sum_v \sum_i \sum_p CVI_{vip} \\
 & * QVI_{vipu} * P_u \\
 & + \sum_u \sum_i \sum_j \sum_p CIJ_{ijp} \\
 & * QIJ_{ijpu} * P_u \\
 & + \sum_u \sum_j \sum_k \sum_p CJK_{jkpu} \\
 & * QJK_{jkpu} * P_u
 \end{aligned}$$

ST:

$$\sum_j QJK_{jkpu} = d_{kpu} ; \quad \forall j.k.p.u \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 \sum_v QVI_{vipu} + \sum_l QLI_{lipu} \\
 = \sum_k QJK_{jkpu} ; \quad \forall i.p.u \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\sum_i QIJ_{ijpu} = \sum_k QJK_{jkpu} ; \quad \forall j.p.u \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 RK_{pu} * \sum_j QJK_{jkpu} \\
 = \sum_l QKL_{klpu} ; \quad \forall k.p.u \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_k QKL_{klpu} \\
 = \sum_i QLI_{lipu} + \sum_v QLV_{lvpu} \\
 + \sum_m QLM_{lmpu} ; \quad \forall l.p.u \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_v QLV_{lvpu} \\
 = RV_p * \sum_k QKL_{klpu} ; \quad \forall l.p.u \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\sum_i QLI_{lipu} = RI_p * \sum_k QKL_{klpu} ; \quad \forall l.p.u \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 \sum_m QLM_{lmpu} \\
 = RM_p * \sum_k QKL_{klpu} ; \quad \forall l.p.u \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\sum_l QLV_{lvpu} \leq CAS_{vp} ; \quad \forall v.p.u \quad (10)$$

$$\sum_l QLI_{lipu} \leq CAR_{ip} * X_i ; \quad \forall i.p.u \quad (11)$$

$$\sum_l QLM_{lmpu} \leq CAM_{mp} * U_m ; \quad \forall m.p.u \quad (12)$$

تأمین کننده، محدودیت ۱۲ برای مراکز انهدام، محدودیت ۱۳ برای مراکز تولیدکننده، محدودیت ۱۴ برای مراکز توزیع کننده و محدودیت ۱۵ برای مراکز جمع آوری در نظر گرفته شده است. همچنین، جریان خروجی از هر یک از مراکز جمع آوری پس از بررسی و تفکیک مواد نباید بیشتر از ظرفیت اسمی هر یک از مراکز باشد که این مسئله در محدودیت ۱۶ تضمین شده است. همچنین، محدودیت های ۱۷ و ۱۸ محدودیت های علامت و متغیرهای صفر و یک هستند.

### روش پژوهش

در این قسمت، توضیحاتی در زمینه الگوریتم حل، ساختار بردار جواب ها و کدگذاری استفاده شده و نیز چگونگی محاسبه مقدار تابع هدف مسئله در هر یک از ذرات ارائه می شود.

### الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات:

ابهرات و کندی برای نخستین بار الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات (PSO) را به همه معرفی کردند [۲۸]. این الگوریتم یکی از قوی ترین الگوریتم های فرا ابتکاری است و با الهام از زندگی دسته جمعی ماهی ها و مهاجرت گروهی پرندگان توسعه داده شده است. در واقع، این الگوریتم از جمله الگوریتم های فرا ابتکاری است که از یک هوش جمعی به منظور جست و جوی فضای جواب و یافتن جواب بهینه استفاده می کند. در الگوریتم PSO هر جواب ممکن برای مسئله، یک ذره نامیده می شود و مجموعه ذرات با یکدیگر جمعیت الگوریتم را تشکیل می دهند. در اولین مرحله از پیاده سازی الگوریتم PSO یک جمعیت تصادفی تولید می شود و در هر تکرار از الگوریتم ذرات با توجه به سرعت قبلی خود ( $v_k^i$ ) و بهترین موقعیتی که تا به حال تجربه کرده اند ( $pbest_k^i$ ) و نیز بهترین موقعیتی که تمامی اعضای جمعیت تاکنون یافته اند ( $gbest_k$ )، سرعت جدیدی خواهند داشت. موقعیت جدید هر ذره با توجه به سرعت جدید و موقعیت قبلیش و با استفاده از رابطه های زیر به روزرسانی می شود:

$$v_{k+1}^i = w \times v_k^i + c_1 \times rand \times (pbest_k^i - x_k^i) + c_2 \times rand \times (gbest_k - x_k^i) \quad (19)$$

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_k^i \quad (20)$$

$$\sum QVI_{vipu} \leq CAI_{ip} \cdot X_i ; \quad \forall i.p.u \quad (13)$$

$$\sum_j QIJ_{ijpu} \leq CAJ_{jp} \cdot Y_j ; \quad \forall j.p.u \quad (14)$$

$$\sum_l QKL_{klpu} \leq CAL_{lp} \cdot Z_l ; \quad \forall l.p.u \quad (15)$$

$$\sum_i QLI_{lipu} + \sum_v QLV_{lvpu} + \sum_m QLM_{lmpu} \leq CAL_{lp} \cdot Z_l ; \quad \forall l.p.u \quad (16)$$

$$QVI_{vipu} \cdot QIJ_{ijpu} \cdot QJK_{jkpu} \cdot QKL_{klpu} \cdot QLI_{lipu} \cdot QLV_{lvpu} \cdot QLM_{lmpu} \geq 0 \quad (17)$$

$$X_i \cdot Y_j \cdot Z_l \cdot U_m \in \{0,1\} \quad (18)$$

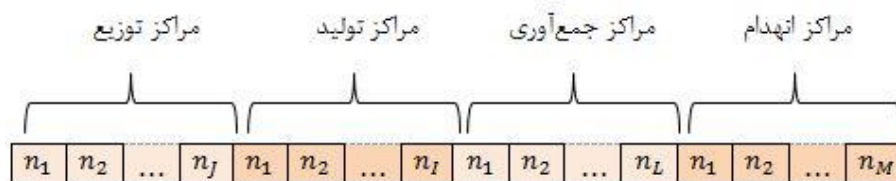
تابع هدف مدل فوق به دنبال کمینه کردن هزینه های کل سیستم است. هزینه های کل سیستم شامل هزینه های ثابت ایجاد تسهیلات، هزینه های عملیاتی و هزینه های حمل و نقل می شود. محدودیت ۲ برآورده شدن تقاضای مشتریان را تضمین می کند. محدودیت های ۳ تا ۹ موجب ایجاد تعادل در شبکه می شوند که در محدودیت ۳، تعادل بین مواد اولیه ورودی از مراکز تأمین کننده و مراکز جمع آوری به مراکز تولید، با تولیدات و محصولات خروجی مراکز تولید را برقرار می کند. در محدودیت ۴، تعادل بین محصولات ورودی به مراکز توزیع با میزان تولیدات مراکز تولید برقرار می شود. در محدودیت ۵، تعادل بین میزان محصولات بازگشتی از مشتریان به مراکز جمع آوری که متناسب با نرخ بازگشت محصولات از مشتریان است ایجاد شده است. با توجه به اینکه مواد پس از بررسی و تفکیک در مراکز جمع آوری به سه مرکز انهدام، تأمین کنندگان و تولیدکنندگان ارسال می شود، محدودیت ۶ وظیفه برقراری این تعادل را در شبکه بر عهده دارد و میزان مواد بازگشتی از مراکز جمع آوری به هر یک از این مراکز متناسب با نرخ بازگشت مواد به ترتیب در محدودیت ۷ برای مراکز تولید، در محدودیت ۸ برای مراکز تأمین کننده و در محدودیت ۹ برای مراکز انهدام مشخص شده است. محدودیت ۱۰ تضمین کننده این موضوع است که مواد بازگشتی از مراکز جمع آوری بیشتر از ظرفیت هر یک از تأمین کنندگان نباشد. مسئله بعدی که باید در جریان تعادلی شبکه برقرار باشد، هماهنگی بین میزان ورودی به هر یک از مراکز با ظرفیت اسمی آن هاست که باید در شبکه مدنظر قرار گیرد و این مسئله به ترتیب در محدودیت ۱۱ برای هر یک از مراکز

و  $S(\cdot)$  یک تابع سیگموئیدال برای تبدیل مقدار سرعت به یک مقدار احتمالی است و مقدار آن با توجه به رابطه ۲۲ محاسبه می‌شود:

$$S(v_{k+1}^i) = \frac{1}{1 + e^{v_{k+1}^i}} \quad (22)$$

### ساختار بردار جواب پیشنهادی

حال بردار جواب استفاده‌شده با جزئیات بیشتری تشریح می‌شود. بردار جواب استفاده‌شده در این پژوهش به صورت یک بردار یک سطر شامل چهار قسمت مستقل با مقادیر عددی پیوسته است. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، قسمت اول، دوم، سوم و چهارم بردار جواب در واقع به ترتیب متغیر احتمالی احداث مراکز توزیع، تولید، جمع‌آوری و انهدام در نقاط کاندید را نمایش می‌دهند. شایان ذکر است براساس این متغیرهای احتمالی و با استفاده از رابطه ۲۲ احتمال احداث یا عدم احداث یک تسهیل محاسبه می‌شود. همان‌طور که گفته شد، بردار جواب مورد استفاده در این پژوهش شامل  $I + J + L + M$  عنصر است و تمام مقادیر عددی عناصر تشکیل‌دهنده بردارهای جواب بین دو عدد ۴- تا ۴ تغییر می‌کند.



شکل ۲. ساختار بردار جواب پیشنهادی

نخست از قسمت مشتریان شروع می‌شود و به ترتیب مشتریان براساس هزینه حمل‌ونقل کمتر به مراکز توزیع احداث‌شده تخصیص داده می‌شوند. در صورتی که تمام تقاضای یک مشتری توسط یک توزیع‌کننده قابل پاسخگویی نباشد، آن مشتری به چندین توزیع‌کننده نزدیک دیگر که هزینه حمل‌ونقل کمتری دارند تخصیص داده می‌شود. همچنین، اگر بخشی از تقاضای مشتری بدون تخصیص باقی بماند و هیچ مرکز توزیع با ظرفیتی باقی نمانده باشد، تقاضای پاسخ داده‌نشده به صورت جریمه و مقدار نشدنی شدن در تابع هدف لحاظ می‌شود. بعد از تخصیص مشتریان به مراکز توزیع و محاسبه مقدار جریان‌های بین مراکز

در رابطه‌های ۱۹ و ۲۰،  $w$  ضریب انرسی،  $v_k^i$  سرعت ذره  $i$  ام در  $k$  امین تکرار،  $x_k^i$  موقعیت فعلی ذره  $i$  ام،  $pbest_k^i$  بهترین تجربه ذره  $i$  ام تا  $k$  امین تکرار،  $gbest_k$  بهترین جواب به دست آمده توسط تمام ذرات تا  $k$  امین تکرار،  $c_1$  و  $c_2$  ثابت‌های شتاب و  $rand$  یک مقدار تصادفی بین مقادیر ۰ تا ۱ است.

### الگوریتم باینری بهینه‌سازی گروه ذرات:

ابهرات الگوریتم باینری بهینه‌سازی گروه ذرات (BPSO) را در سال ۱۹۹۷ به منظور بهینه‌سازی در فضای باینری توسعه داد [۲۹]. در این الگوریتم برخلاف الگوریتم PSO پیوسته، سرعت هر یک از ذرات یک متغیر احتمالی است که براساس آن موقعیت جدید هر ذره به روزرسانی می‌شود. باید توجه داشت موقعیت جدید ذرات متغیری باینری است و فقط می‌تواند مقادیر صفر یا یک داشته باشد. در الگوریتم BPSO موقعیت جدید ذرات با توجه به رابطه‌های زیر به روزرسانی می‌شوند:

$$x_{k+1}^i = \begin{cases} 0 & \text{if } rand \geq S(v_{k+1}^i) \\ 1 & \text{if } rand < S(v_{k+1}^i) \end{cases} \quad (21)$$

در رابطه ۲۱،  $rand$  یک مقدار تصادفی بین صفر و یک

### محاسبه مقدار تابع برازش مربوط به ذرات

به منظور محاسبه مقدار تابع هدف هر یک از ذرات، در گام نخست با استفاده از رابطه‌های ۲۱ و ۲۲، مقدار متغیرهای احتمالی بردار جواب‌ها به بردارهایی با مقادیر قطعی صفر و یک تبدیل می‌شود که در واقع مقدار یک در این ذرات احداث تسهیل و مقدار صفر عدم احداث یک تسهیل خاص را نمایش می‌دهند. براین اساس، با تبدیل بردار ذرات به یک بردار صفر و یک، مقادیر متغیرهای تصمیم  $X_i$ ،  $Y_j$ ،  $U_m$  و  $Z_l$  محاسبه می‌شود و هزینه‌های مربوط به احداث تسهیلات تعیین می‌شود. در گام بعد، نوبت به محاسبه میزان جریان‌های بین تسهیلات مختلف می‌رسد. بدین منظور،



$$B = \begin{cases} Z & \text{if } Pe = 0 \\ Z + FixP + Pe * VarP & \text{if } Pe \geq 0 \end{cases} \quad (23)$$

در رابطه ۲۳، B نشان‌دهنده تابع برآزش مربوط به ذرات است. مقدار Z مطابق با تابع هدف مدل پیشنهادی عبارت است از مجموع هزینه‌های تأسیس تسهیلات، تولید، بازسازی، بازرسی، انهدام و حمل‌ونقل هر واحد کالا بین بخش‌های مختلف زنجیره تأمین. Pe مقدار جریمه نشدنی بودن جواب‌هاست. همچنین، FixP و VarP به ترتیب عبارت‌اند از جریمه ثابت و متغیر مربوط به بردارهای جواب ذرات. باید توجه داشت در صورت نشدنی شدن یک ذره، مستقل از میزان نشدنی بودن آن یک جریمه ثابت و نیز متناسب با مقدار نشدنی بودن آن یک جریمه متغیر به مقدار برآزش آن ذره اضافی می‌شود تا با استفاده از این تکنیک، الگوریتم توان بیشتری را صرف جست‌وجو در فضای شدنی مسئله کند و اهمیت کمتری برای جواب‌های نشدنی قائل شود.

### مثال‌های عددی

در این قسمت، توضیحاتی در زمینه مثال‌های عددی مورد استفاده در این پژوهش ارائه می‌شود. با توجه به عدم تشابه بسیاری از پارامترها و بخش‌های شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی با دیگر پژوهش‌های موجود در ادبیات این موضوع و نیز وجود تعداد زیادی پارامتر جدید در این پژوهش که در پژوهش‌های پیشین مطرح نشده بود، مثال‌های عددی تصادفی به منظور تست الگوریتم‌ها و مدل مطابق جدول ۲ تولید شده است.

توزیع و مشتریان، نوبت محاسبه میزان جریان از کارخانه‌های تولیدی به مراکز توزیع است. در این مرحله نیز به ترتیب براساس مجموع کمترین هزینه‌های حمل‌ونقل و تولید هر واحد محصول در کارخانه‌های احداث‌شده، مراکز توزیع به کارخانه‌های احداثی تخصیص داده می‌شود و تقاضای تخصیص داده‌نشده به صورت جریمه با جریمه محاسبه‌شده در مرحله قبل جمع می‌شود و بدین صورت جریان بین کارخانه‌های تولیدی و مراکز توزیع محاسبه می‌شود. براین اساس، به ترتیب جریان کالا، بین مشتریان و مراکز جمع‌آوری احداث‌شده، جریان کالای بین مراکز جمع‌آوری احداثی و مراکز انهدام تأسیس‌شده و سپس جریان کالا بین مراکز جمع‌آوری و تأمین‌کنندگان محاسبه می‌شوند. در پایان نیز براساس میزان جریان خروجی از کارخانه‌ها به مراکز توزیع و نیز مقدار جریان از مراکز جمع‌آوری به تأمین‌کنندگان، مقادیر جریان کالا از مراکز جمع‌آوری و تأمین‌کنندگان به کارخانه‌ها محاسبه می‌شوند. شایان ذکر است در صورتی که در هر یک از مراحل فوق، ظرفیت‌های نقاط احداث‌شده قابلیت پاسخگویی به تقاضای سطوح بعد از خود را نداشته باشند، مقدار تقاضای پاسخ داده‌نشده در آن سطح به صورت جریمه به تابع هدف اعمال می‌شود؛ بنابراین، می‌توان مقدار جریمه را حاصل از مجموع کمبود ظرفیت در مراکز توزیع، تولید، جمع‌آوری و انهدام دانست. براین اساس، با توجه به شدنی بودن و نشدنی بودن جواب و مقدار جریمه مقدار برآزش مربوط به ذرات با استفاده از رابطه ۲۳ قابل محاسبه است:

جدول ۲. توزیع احتمال پارامترهای مدل

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$pc_{ip}$	Unif(1,5)	$RM_p$	Unif(.2, .8)
$OC_{jp}$	Unif(1,5)	$CAI_{ip}$	Unif(3000, 15000)
$IC_{lp}$	Unif(1,5)	$CAJ_{jp}$	Unif(3000, 15000)
$RMC_{ip}$	Unif(1,5)	$CAL_{lp}$	Unif(3000, 18000)
$RSC_{vp}$	Unif(1,5)	$CAM_{mp}$	Unif(3000, 15000)
$DC_{mp}$	Unif(1,5)	$d_{kpu}$	Unif(100,200)
$CVI_{vip}$	Unif(1,4)	$FY_j$	Unif(500, 2000)
$CIJ_{ijp}$	Unif(1,4)	$FZ_l$	Unif(600, 1500)
$CJK_{jkp}$	Unif(1,4)	$RK_{pu}$	Unif(.6, 1)
$CKL_{klp}$	Unif(1,4)	$CAR_{ip}$	Unif(3000, 15000)
$CLM_{lmp}$	Unif(1,4)	$CAS_{vp}$	Unif(3000, 15000)
$CLI_{lp}$	Unif(1,4)	$FX_i$	Unif(1000, 3000)
$CLV_{lvp}$	Unif(1,4)	$FU_m$	Unif(1000, 1500)
$RI_p$	Unif(.2,.5)	$RV_p$	Unif(.2,.6)

تمام داده‌ها با استفاده از توزیع یکنواخت تولید شده است و کران بالا و پایین مربوط به توزیع یکنواخت هریک از پارامترها در این جدول موجود است. شایان ذکر است در مثال‌های عددی مجموع سه پارامتر  $RV_p$  و  $RM_p$ ،  $RI_p$  به‌ازای هر  $p$  برابر یک است. همچنین، بررسی شده است.

اطلاعات ابعاد مثال‌های عددی مورد استفاده در جدول ۳ قابل مشاهده است. همان‌طور که از اطلاعات درون جدول مشخص است، در مجموع ۱۵ مسئله در سه ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ تولید شده و از هر بعد، ۵ مسئله تصادفی بررسی شده است.

جدول ۳. مشخصات مسئله در اندازه‌های متفاوت

تعداد سناریوها	تعداد محصولات	تعداد مراکز انبار	تعداد مراکز جمع‌آوری	تعداد مشتریان	تعداد توزیع‌کنندگان	تعداد کارخانه‌ها	تعداد تأمین‌کنندگان	اندازه مثال عددی	مثال عددی
۵	۳	۱	۲	۵	۲	۴	۴	کوچک	۱
۸	۳	۱	۲	۵	۲	۵	۵	کوچک	۲
۸	۴	۱	۲	۱۰	۲	۶	۶	کوچک	۳
۱۰	۴	۲	۳	۱۵	۲	۵	۵	کوچک	۴
۱۰	۴	۲	۳	۱۵	۳	۶	۶	کوچک	۵
۱۵	۱۰	۵	۱۰	۳۰	۲۰	۱۰	۸	متوسط	۶
۱۵	۲۰	۵	۱۰	۳۰	۲۰	۱۰	۸	متوسط	۷
۲۰	۱۰	۱۰	۱۵	۳۰	۲۰	۱۰	۱۰	متوسط	۸
۲۰	۲۰	۱۰	۱۵	۳۰	۲۵	۱۲	۱۲	متوسط	۹
۲۵	۲۰	۱۰	۱۵	۳۰	۲۵	۱۵	۱۵	متوسط	۱۰
۳۰	۱۰	۱۰	۱۵	۵۰	۲۰	۲۰	۲۰	بزرگ	۱۱
۳۰	۲۰	۱۰	۱۵	۵۰	۲۵	۲۰	۲۰	بزرگ	۱۲
۳۰	۲۰	۱۵	۱۵	۵۰	۲۰	۲۵	۲۵	بزرگ	۱۳
۳۰	۲۰	۱۵	۲۰	۵۰	۲۰	۲۵	۲۵	بزرگ	۱۴
۳۰	۲۰	۱۵	۲۰	۵۰	۲۵	۳۰	۳۰	بزرگ	۱۵

هریک از عوامل مؤثر بر آزمایش، مجموعه‌ای از طرح‌ها به‌منظور آزمایش به آزمایشگر پیشنهاد می‌شود که آزمایشگر می‌تواند با انتخاب یکی از طرح‌های مناسب ارائه شده در روش تاگوچی، که با تعداد سطوح و نوع آزمایش‌های هم‌خوانی دارد، آزمایش‌ها را انجام دهد. سپس داده‌های خروجی حاصل از اجرای آزمایش‌ها به طرح تاگوچی بازگردانده می‌شود و در نهایت، تجزیه و تحلیل انجام‌گرفته توسط روش تاگوچی، پژوهشگر را به نحوه تأثیرگذاری هریک از عوامل روی عامل وابسته فرایند رهنمون می‌سازد [۳۰]. در واقع، این روش داده‌های تکراری

### تنظیم پارامتر به روش تاگوچی

روش تاگوچی یکی از پرکاربردترین روش‌های آماری برای تحلیل حساسیت خروجی یک فرایند در حوزه طراحی آزمایش‌ها به‌شمار می‌رود. هنگامی که تعداد حالت‌های ممکن برای تعیین سطوح بهینه عوامل تأثیرگذار بر یک فرایند زیاد باشد، با استفاده از این روش می‌توان با کاهش تعداد آزمایش‌های ممکن، بهترین سطوح عوامل را تعیین کرد و در زمان و حجم محاسبه صرفه‌جویی چشمگیری ایجاد کرد.

در روش تاگوچی، پس از تعریف سطوح مدنظر برای

جواب‌های به‌دست‌آمده به‌عنوان خروجی حاصل از آزمایش‌ها به الگوریتم تاگوچی داده شد تا بدین‌صورت پارامترهای بهینه الگوریتم برای هر مثال تعیین شود. شکل ۳ و ۴ به ترتیب آثار اصلی میانگین و نسبت سیگنال به نویز را در ۲۷ آزمایش انجام‌شده برای مثال عددی اول نمایش می‌دهد. تقریباً در تمام مثال‌های عددی دیگر همین پارامترها به‌عنوان پارامترهای بهینه الگوریتم استخراج شد. براین‌اساس، چهار پارامتر اندازه جمعیت،  $W$ ،  $C_1$  و  $C_2$  به ترتیب باید در سطح‌های بالا، متوسط، بالا و بالای خود قرار گیرند تا الگوریتم BPSO بتواند به بهترین شکل ممکن عمل کند. بهترین سطوح پارامترهای این الگوریتم را می‌توان در جدول ۵ مشاهده کرد.

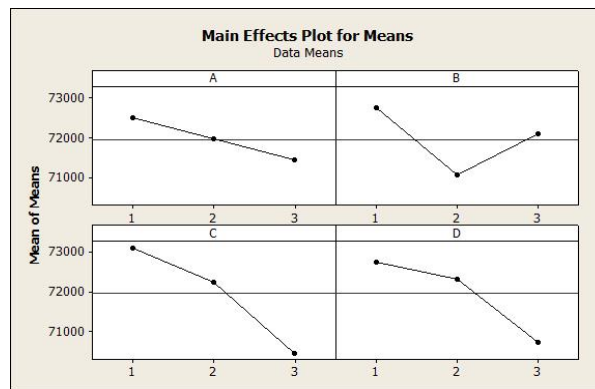
به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها را به یک نشانگر تغییرات تبدیل می‌کند که به آن تبدیل نسبت سیگنال به نویز گفته می‌شود. هدف از روش تاگوچی، حداکثرسازی این نشانگر است. در الگوریتم BPSO مورد استفاده، سطوح هریک از پارامترهای موجود در جدول ۴ نمایش داده می‌شود. با توجه به توضیحات ارائه‌شده در مورد روش تاگوچی، در هریک از مثال‌های عددی مورد بررسی، ۲۷ آزمایش توسط این روش پیشنهاد شد. سپس به‌ازای هریک از مثال‌های عددی، با توجه به هریک از آزمایش‌های پیشنهادشده توسط روش تاگوچی، پارامترهای الگوریتم BPSO تغییر داده شد و بعد از ۱۰ مرتبه اجرای الگوریتم در یک زمان مساوی برای هر مثال عددی، مجموعه

جدول ۴. سطوح تعریف‌شده برای پارامترهای الگوریتم BPSO

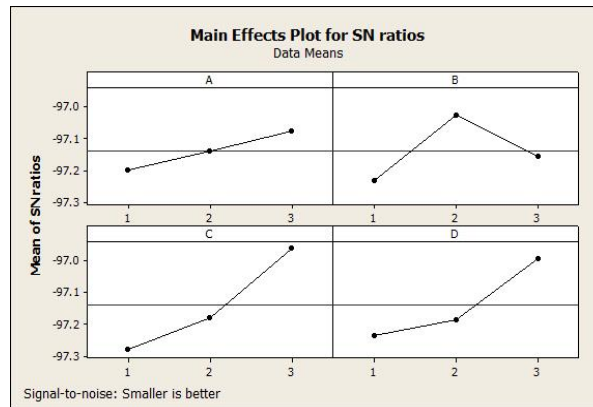
نام پارامتر	سطح پایین	سطح متوسط	سطح بالا
اندازه جمعیت	۵۰	۷۵	۱۰۰
W	۰/۵	۱	۱/۵
$C_1$	۱	۱,۵	۲
$C_2$	۱	۱,۵	۲

جدول ۵. مقادیر پارامترهای بهینه مربوط به الگوریتم BPSO

نام پارامتر	سطح مناسب
اندازه جمعیت	۱۰۰
W	۱
$C_1$	۲
$C_2$	۲



شکل ۳. نمایش آثار اصلی میانگین در آزمایش‌های انجام‌گرفته



شکل ۴. نمایش آثار نسبت سیگنال به نویز در آزمایش‌های انجام گرفته

## نتیجه‌گیری

همان‌طور که در قسمت‌های قبلی پژوهش گفته شد، در این پژوهش نخست مدل شبکه‌حلقه بسته تکمیل شد و سپس با توجه به اینکه مدل ارائه‌شده در اندازه بزرگ مثال‌های عددی، متغیرهای تصمیم و پارامترهای زیادی داشت و برای حل بهینه آن به زمان و حافظه زیادی نیاز بود، به منظور حل مسائل با اندازه متوسط و بزرگ از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات استفاده شد. برای نشان دادن عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی، ۱۵ مسئله در اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ تولید شد و نتایج پیاده‌سازی الگوریتم با نتایج دقیق به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار گمز مقایسه شد. از لپ‌تاپ ASUS مدل X450C با CPU پنج هسته‌ای 1.8GHz و RAM 4GB به منظور حل مسائل استفاده شد. همچنین، از نرم‌افزار متلب ۲۰۱۳ به منظور پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات و نیز نرم‌افزار گمز با استفاده از solver, BONMIN به منظور یافتن جواب بهینه استفاده شد.

برای مقایسه الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات و خروجی نرم‌افزار گمز، هر مثال عددی ۵ مرتبه توسط الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات اجرا شد. زمان‌های اجرای هر دسته از مسائل در ابعاد یکسان برابر فرض شد، به طوری که برای حل مسائل با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب ۹۰، ۳۰۰ و ۹۰۰ ثانیه زمان به الگوریتم تخصیص داده شد و براین اساس، نتایج جدول ۶ استخراج شد. نتایج استخراج شده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات در قالب بهترین نتیجه به دست آمده از پنج بار اجرای الگوریتم و نیز

میانگین جواب حاصل از این پنج بار تکرار گزارش شده است. همچنین، بهترین جواب‌های به دست آمده به صورت برجسته نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که از جدول ۶ مشخص است، نرم‌افزار گمز توانسته است در ۱۰ مسئله کوچک و متوسط اول به جواب بهینه دست یابد، در حالی که الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات فقط در سه مسئله کوچک ۲ و ۳ و ۴ جواب بهینه را یافته است. همچنین، نرم‌افزار گمز از نظر زمانی فقط در پنج مسئله کوچک توانسته است الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات را مغلوب سازد و در مثال‌های عددی متوسط الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات با صرف زمانی کمتر توانسته است جواب‌های شدنی خوبی را شناسایی کند، به طوری که شکاف‌های به دست آمده در پنج مثال عددی متوسط تقریباً ۴ درصد است که یک شکاف قابل قبول محسوب می‌شود. باید توجه داشت عملکرد خوب الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات در مسائل بزرگ به خوبی قابل مشاهده است، به طوری که در این گروه از مثال‌ها نرم‌افزار گمز قادر به حل بهینه برای مسئله نبوده و به دلیل حافظه کم کامپیوتری حتی یک جواب شدنی برای مسائل عددی بزرگ پیدا نکرده است، در حالی که الگوریتم فرا ابتکاری توسعه داده شده توانسته است در زمان ۹۰۰ ثانیه‌ای به یک جواب شدنی برای مثال‌های عددی پیشنهادی دست یابد که این موضوع مؤید توانایی الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات در مواجهه با مسائل بزرگ است. به منظور مطالعات آتی توصیه می‌شود الگوریتم‌های فرا ابتکاری دیگر روی این مسئله پیاده‌سازی شوند تا بهترین الگوریتم فرا ابتکاری برای حل این مسئله مشخص شود.

همچنین، توصیه می‌شود عدم قطعیت موجود در تقاضا با استفاده از بهینه‌سازی استوار یا بهینه‌سازی احتمالی فرمول‌بندی و حل شود. علاوه‌براین، ارائه یک مدل چنددوره‌ای موضوعی جالب و چالش‌برانگیز برای مطالعات آتی است.

جدول ۶. مقایسه نتایج الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات و نرم‌افزار گمز

شکاف	خروجی نرم‌افزار گمز		خروجی الگوریتم BPSO			مثال عددی
	زمان (ثانیه)	جواب بهینه	زمان (ثانیه)	میانگین مقدار تابع هدف	بهترین مقدار تابع هدف	
۲/۴۸	۱۰/۲	۶۸۸۲۴/۲	۹۰	۷۰۵۳۵/۷	۶۹۲۲۴/۲	۱
۰	۱۲/۷	۱۰۴۲۷۰/۵	۹۰	۱۰۴۲۷۰/۵	۱۰۴۲۷۰/۵	۲
۰	۱۸/۵	۷۳۸۰۴/۴	۹۰	۷۳۸۰۴/۴	۷۳۸۰۴/۴	۳
۱/۱۰	۴۵/۸	۱۱۶۰۶۴/۳	۹۰	۱۱۷۳۴۸/۶	۱۱۶۰۶۴/۳	۴
۴/۱۹	۴۲/۹۰۸	۱۱۹۰۶۳/۹	۹۰	۱۲۴۰۶۳/۵	۱۲۳۷۴۰/۹	۵
۷/۴۵	۲۲۴۳/۶	۳۵۳۵۷۲/۵	۳۰۰	۳۷۹۹۴۳	۳۶۷۳۸۴/۷	۶
۴/۳۳	۲۶۸۳/۴	۳۷۱۰۴۱/۰	۳۰۰	۳۸۷۱۱۹/۷	۳۷۴۸۶۲/۲	۷
۴/۱۶	۳۱۰۴/۶	۴۵۹۴۳۵/۸	۳۰۰	۴۷۸۵۵۳/۸	۴۶۹۹۳۳/۴	۸
۶/۳۶	۳۰۹۶/۴	۶۱۲۳۵۵/۸	۳۰۰	۷۱۱۴۰۴	۶۷۵۳۸۲	۹
۲/۷۸	۳۴۷۰/۳	۶۸۲۳۵۵/۸	۳۰۰	۷۰۱۳۴۹/۲	۶۸۳۴۲۴/۴	۱۰
-----	-----	-----	۹۰۰	۱۰۹۵۹۰۷/۷	۱۰۴۷۷۶۶/۹	۱۱
-----	-----	-----	۹۰۰	۱۲۲۱۳۹۴/۲	۱۱۳۳۵۳۴/۱	۱۲
-----	-----	-----	۹۰۰	۱۲۵۳۴۵۸/۷	۱۱۶۶۴۶۸/۱	۱۳
-----	-----	-----	۹۰۰	۱۴۲۳۹۲۴/۷	۱۲۲۴۰۹۹/۲	۱۴
-----	-----	-----	۹۰۰	۱۳۹۹۷۴۵/۸	۱۳۶۹۵۷۰/۹	۱۵

## مراجع

1. Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J. A. and Van Wassenhove, L. N. (1997). "Quantitative models for reverse logistics: A review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 103, No. 1, PP. 1-17.
2. Baumgarten, H., Butz, C., Fritsch, A. and Sommer-Dittrich, T. (2003). "Supply chain management and reverse logistics-integration of reverse logistics processes into supply chain management approaches", *In Electronics and the Environment, IEEE International Symposium on. IEEE*, PP. 79-83.
3. Daskin, M. S. (1995). *Network and discrete location: Models, algorithms, and applications*, Wiley, New York.
4. Melo, M. T., Nickel, S. and Gama, F. S. (2009). "Facility location and supply chain management", *European Journal of Operation Research*, Vol. 196, No. 2, PP. 401-412.
5. Melkote, S. and Daskin, M. S. (2001). "Capacitated facility location/network design problem", *European Journal of Operation Research*, Vol. 129, No. 3, 481-495.
6. Yaghoubi, et al. (2016). "Location and Allocation of a Distribution System Considering Disruption in Mobile Warehouses and Backup Facilities", *Journal of Industrial Engineering*, Vol.50, No.1, PP. 147-164.

7. Ambrosino, D. and Scutella, M. G. (2005). "Distribution network design: New problems and related models", *European Journal of Operational Research*, Vol. 165, No. 3, PP. 610-624.
  8. Nga Thanh, P., Bostel, N. and Peton, O. (2008). "A dynamic model for facility location in the design of Complex supply chains", *International Journal of Production Economics*, Vol. 113, No. 2, PP. 678-693.
  9. Louwers, Dirk, et al. (1999). "A facility location allocation model for reusing carpet materials", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 36, No. 4, PP. 855-869.
  10. Lu, Z. and Bostel, N. (2007). "A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities", *Computers & Operations Research*, Vol. 34, No. 2, 299–323.
  11. Pishvae, M. S. and Shakouri, H. (2009, November). A System Dynamics Approach for Capacity Planning and Price Adjustment in a Closed-Loop Supply Chain. In Computer Modeling and Simulation, 2009. EMS'09. Third UKSim European Symposium on (pp. 435-439). IEEE.
  12. Chopra, S. and Meindl, P. (2007). Supply chain management. Strategy, planning & operation. *Das summa summarum des management*, 265-275.
  13. Fleischmann, Moritz, et al. (2001). "The impact of product recovery on logistics network design", *Production and operations management*, Vol. 10, No. 2, PP. 156-173.
  14. Jayaraman, V., Guide Jr, V. D. R. and Srivastava, R. (1999). "A closed-loop logistics model for remanufacturing", *Journal of the operational research society*, Vol.50, No.5, PP. 497-508.
  15. Fleischmann, M. et al. (2001). "The impact of product recovery on logistics network design", *Production and operations management*, Vol. 10, No. 2, PP. 156-173.
  16. Seuring, S. (2013). "A review of modeling approaches for sustainable supply chain management", *Decision Support Systems*, Vol. 54, No. 4, PP. 1513-1520.
  17. Minner, S. (2003). "Multiple-supplier inventory models in supply chain management: A review", *International Journal of Production Economics*, Vol. 81-82, PP. 265-279.
  18. Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., and Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, Vol.179, No.3, 1063-1077.
  19. Baghalian, A., Rezapour, S. and Farahani, R. Z. (2013). "Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case", *European Journal of Operational Research*, Vol. 227, No. 1, PP. 199- 215.
  20. Pishvae, M. S., Rabbani, M. and Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 35, No. 2, 637-649.
  21. Amin, S. H. and Zhang, G. (2012). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach. *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 8, 6782-6791.
  22. Amin, S. H. and Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 6, 4165-4176.
  23. Mirghafoori, H. (2001). *Mathematical planning of supply chain of Yazd tire industry*, Ph.D. Thesis in production management, Tabiat Modarress University.
  24. El-Sayed, M., Afia, N. and El-Kharbotly, A. (2010). A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 58, No. 3, 423-431.
  25. Zhang, W. and Xu, D. (2014). Integrating the logistics network design with order quantity determination under uncertain customer demands. *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, No. 1, 168-175.
-

26. Yousefi, B. A. and Shishebori, D. (2015). "Robust optimization of integrated reverse logistic network design at uncertain conditions", *Journal of Industrial Engineering*, Vol.49, No.2, PP. 299-313.
  27. Saffar, M., Ganjavi, M., Shakouri, H. and Razmi, J. (2015). "A green closed loop supply chain network design considering operational risks under uncertainty and solving the model with NSGA II algorithm", *Journal of Industrial Engineering*, Vol.49, No.1, PP. 55-68.
  28. Eberhart, R. and Kennedy, J. (1995, October). A new optimizer using particle swarm theory. In *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on* (pp. 39-43). IEEE.
  29. Eberhart, R. C. (1997). "A discrete binary version of the particle swarm algorithm", *In: Proceedings of 1997 conference systems man cyber-netics*, NJ: Piscataway, PP. 4104-4108.
  30. Roy, R. K., A primer on the Taguchi method. 2nd ed. 2010, Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers.
-