

## ارائه یک الگوریتم ترکیبی برای حل مسئله مکانیابی-مسیریابی چند کالایی با در نظر گرفتن سیستم‌های فرابارانداز در زنجیره تامین

پرویز فتاحی\*، ملیحه معصومی\*\*، جواد بهنامیان\*\*\*

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۲۳

تاریخ پذیرش: ۹۶/۲/۲۰

### چکیده

مسئله مکانیابی-مسیریابی با وجود سیستم‌های فرابارانداز به عنوان یک زمینه تحقیقاتی جدید برای شبکه‌های توزیع در زنجیره تامین محسوب می‌شود. هدف از این مسئله طراحی همزمان یک مکان برای مرکز فرابارانداز و مسیریابی وسایل نقلیه با توجه به حداقل سازی هزینه‌های سیستم می‌باشد، که به عنوان یک مسئله  $NP-hard$  شناخته شده است. در تحقیق حاضر، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) دو مرحله‌ای برای مسئله مکانیابی-مسیریابی چند کالایی با در نظر گرفتن مراکز فرابارانداز با توجه به کاربردهای بالقوه آن در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. نوآوری اصلی این مقاله در چند کالایی بودن مدل پیشنهادی و همچنین روش حل آن به صورت یک الگوریتم ترکیبی بر مبنای دو الگوریتم فرابکارایی سیستم ایمنی مصنوعی بدن و ازدحام ماهی‌های مصنوعی می‌باشد، فرضیاتی نیز در مدل پیشنهادی ارائه شده است که آن را از مدل‌های ارائه شده در این حوزه متمایز می‌سازد. برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، ابتدا مسائل نمونه‌ای با اندازه کوچک و بزرگ به صورت تصادفی تولید شده و مدل MIP توسط الگوریتم‌های دقیق، سیستم ایمنی مصنوعی بدن، ازدحام ماهی‌های مصنوعی و یک الگوریتم نمونه، حل و سپس با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهاد شده در این پژوهش، جواب‌های بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های بیان شده ارائه می‌دهد و همگرایی مناسبی به راه حل‌های مطلوب دارد.

**واژگان کلیدی:** شبکه‌های توزیع؛ مکانیابی-مسیریابی چند کالایی؛ سیستم‌های فرابارانداز؛ الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی بدن، الگوریتم ازدحام ماهی‌های مصنوعی.

\*دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران، (نویسنده مسئول) p.fattahi@alzahra.ac.ir

\*\*دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

\*\*\*استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

## مقدمه

به طور کلی، هزینه‌های لجستیک، بخش بزرگی از بودجه‌ی شرکت‌ها را مصرف می‌کنند. این هزینه‌ها را می‌توان به طور قابل توجهی با طراحی دقیق زنجیره تامین، کاهش داد. شبکه‌های توزیع در پایان زنجیره، اهمیت بسیار بالایی دارند زیرا در بسیاری از جریان‌های تولیدی کوچک، با مشتریان و خرده‌فروشان نهایی درگیر هستند. در پی مطرح شدن مباحث لجستیک شهری، وجود شبکه‌های ارتباطی کارآمد بین تامین‌کنندگان و مشتریان اهمیت پیدا کرد. هدف لجستیک شهری، بهینه‌سازی فعالیت‌های لجستیکی و باربری انجام شده از سوی شرکت‌های حمل‌ونقل در مناطق شهری و در عین حال، توجه به فضاهای عبور و مرور، ترافیک و مصرف انرژی در چارچوب اقتصادی بازار می‌باشد. لجستیک شهری با بکارگیری ابزارهای توزیع بار در مناطق شهری می‌تواند کارایی کلی این روند را بهبود بخشد. با مدیریت ارتباط بین تامین‌کنندگان و مشتریان در سیستم لجستیک شهری می‌توان مکان صحیح تسهیلات را به دست آورد و شبکه‌های حمل و نقل کارآمدی را برای ارتباط مشتریان با تسهیلات طراحی کرد. یکی از مسائلی که در این زمینه نقش مهمی ایفا می‌کند مسئله‌ی مکانیابی - مسیریابی است. این مسئله در محیط‌های لجستیکی به مدیران کمک می‌کند تا ارتباط بین تامین‌کنندگان و مشتریان را مدیریت کنند و یک زنجیره منسجم و بهینه برای تامین تقاضای مشتریان شکل دهند (پرودهن<sup>۱</sup> و پرینز<sup>۲</sup>، ۲۰۱۴).

طراحی شبکه‌های توزیع در پایان زنجیره، دو مسئله بهینه‌سازی سخت را بوجود می‌آورد، یکی مکانیابی انبارها و دیگری مسیریابی وسایل نقلیه، و مدتی طولانی است که به طور جداگانه به این نوع تصمیم‌گیری‌ها پرداخته شده است. اما پیشرفت‌های مداوم در تکنیک‌های بهینه‌سازی، امکان شناخت رویکردهای یکپارچه‌ای را به نام مسائل مکانیابی - مسیریابی ایجاد کردند. ایده‌ی ترکیب مسائل مکانیابی انبار و مسیریابی وسایل نقلیه قدمتی نزدیک به ۵۰ سال دارد. در آن زمان وابستگی بین این دو نوع تصمیم‌گیری برجسته شده بود اما بهینه‌سازی و محاسبات

1- Prodhon, C.

2- Prins, C.

کامپیوتری به اندازه‌ی کافی در ذهن، مجسم یک رفتار یکپارچه توسعه یافته نبود (بوونتر<sup>۱</sup>، ۱۹۶۱؛ مارانزانا<sup>۲</sup>، ۱۹۶۴؛ وب<sup>۳</sup>، ۱۹۶۸). واتسون-گاندی<sup>۴</sup> و دوهرن<sup>۵</sup> (۱۹۷۳) احتمالاً اولین نویسندگانی بودند که به وضوح مواجه شدن مشتریان با انبارها را ضمن مکانیابی، از طریق مدل‌سازی یک تابع سود غیرخطی، و با کاهش فروش و همچنین با فاصله از انبار، در نظر گرفتند.

سیستم‌های فرابارانداز، یک تکنیک لجستیک نسبتاً کارآمد است که می‌تواند به سرعت برای یکپارچه‌سازی محموله‌ها از منابع مختلف استفاده و منجر به صرفه‌جویی در شاخص‌های حمل و نقل، شود. لذا تمرکز سیستم‌های فرابارانداز از مدیریت زنجیره تامین به مدیریت زنجیره تقاضا تغییر پیدا کرده است. موجودی‌هایی که به مراکز فرابارانداز وارد می‌شوند، از قبل تخصیص داده شده و در مقابل سفارش دوباره پرسازی توسط یک خرده فروش در زنجیره‌ی تامین ایجاد می‌شود. این سیستم کمک می‌کند تا هزینه‌های عملیات و سطح موجودی کاهش ، و توان عملیاتی و فضای فروش، افزایش پیدا کند. در برخی موارد خرده فروشان اتلافات مرتبط با نگهداری با ثبات واحدهای موجودی، و تقاضای بالا را شناسایی کرده و همچنین سیستم‌های فرابارانداز را به عنوان راهی برای کاهش هزینه‌های نگهداری موجودی می‌دانند. سیستم‌های فرابارانداز اساساً تابعی از نگهداری موجودی یک انبار می‌باشند.

هدف اصلی این پژوهش، به طور خاص بررسی چند مکانیزم کنترل پیچیده از مکانیزم‌هایی است که در طول ادبیات این موضوع یافت شده‌اند و همچنین گزارش عملکرد الگوریتم ارائه شده در بخش‌های آتی می‌باشد. از این رو به منظور نشان دادن تاثیر عملی نتایج اصلی و رفتار یک الگوریتم فراابتکاری را برای مسئله سیستم‌های فرابارانداز، بررسی می‌کنیم.

در بخش بعدی به مرور ادبیات مربوطه برای مکانیابی-مسیریابی سیستم‌های فرابارانداز در زنجیره تامین و بررسی روش‌های حل این مسئله می‌پردازیم. در بخش ۳ ابتدا تعریفی از مسئله

1- Boventer

2- Maranzana, F. E.

3- Webb, M. H. J.

4- Watson-Gandy, C. D. T.

5- Dohrn, P. J.

و سپس مدلی دو مرحله‌ای برای مکانیابی-مسیریابی چندکالایی با در نظر گرفتن سیستم فرابارانداز ارائه می‌شود. به دنبال آن در بخش ۴ به بیان ساختار کلی الگوریتم ترکیبی سیستم ایمنی مصنوعی بدن و ازدحام ماهی‌های مصنوعی و همچنین جزئیات بیشتر در رابطه با این الگوریتم فرابتکاری می‌پردازیم. در بخش ۵ نتایج عددی مسئله با تولید ۱۳ مسئله نمونه‌ای تصادفی و حل آن توسط الگوریتم پیشنهادی، بررسی می‌شود. در آخرین بخش از مقاله نیز نتایج و پیشنهادات آتی مورد بحث قرار می‌گیرد.

### مرور ادبیات

مکانیابی یک یا تعداد بیشتری از سیستم‌های فرابارانداز، بخشی از طراحی شبکه‌های توزیع و یا زنجیره تامین می‌باشند. یک استراتژی باید در رابطه با موقعیت این سیستم‌های فرابارانداز تصمیم‌گیری کند. این مسئله نمی‌تواند به طور جداگانه از تصمیم‌گیری در رابطه با نحوه‌ی جریان کالاها در این شبکه‌ها، به کار گرفته شود (وان بله<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۲). تعیین جریان کالاها موضوع مورد بحث ما نیست و تنها مسائلی در اینجا در نظر گرفته می‌شود که در رابطه با تصمیم‌گیری برای مکانیابی سیستم‌های فرابارانداز است. مسائلی که در آن تسهیلات (به عنوان مثال، مراکز توزیع و کارخانه‌ها) مکانیابی می‌شوند، توجهات زیادی را به خود جلب کرده‌اند.

اولین مطالعه پیرامون مکانیابی سیستم‌های فرابارانداز توسط سانگ و سونگ<sup>۲</sup> (۲۰۰۳) اجرا شد. در مسئله‌ای که آنها در نظر گرفتند، کالاها باید از تامین‌کننده به نقاط تقاضا توسط سیستم‌های فرابارانداز منتقل می‌شدند (ناوگان‌های حمل و نقل مستقیم مجاز نبودند). مراکز فرابارانداز می‌توانند از مجموعه‌ای از مکان‌های امکان‌پذیر و هر یک با یک هزینه ثابت، انتخاب شوند. در مطالعه‌ی آنها تقاضا مشخص فرض می‌شود و دو نوع وسیله‌ی نقلیه با هزینه‌ها و ظرفیت‌های متفاوت وجود دارد. هدف آنها یافتن فراباراندازی مناسب جهت استفاده بود و

1- Van Belle, J.

2- Sung, C. S., & Song, S. H.

اینکه چند وسیله نقلیه در هر اتصال با توجه به حداقل کردن هزینه‌های کل لازم است. هزینه‌های کل شامل هزینه‌های ثابت استفاده از فرابارانداز و هزینه‌های حمل و نقل است. این نویسندگان یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح را برای این مسئله ارائه کردند. این مدل بسیار شبیه به مدل ارائه شده توسط دونالدسون<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۸) و همچنین موسی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۰) می باشد که فرض‌های ساده و مشابهی استفاده شده است. به هر حال مقایسه این دو مقاله نشان می‌دهد که سانگ و سونگ ناوگان‌های حمل و نقل مستقیم را در نظر نگرفتند اما تصمیمات مکانی را شامل شدند. از آنجایی که این مسئله NP-hard است، در مطالعه‌ی آنها یک الگوریتم مبتنی بر جستجوی ممنوع برای حل مسئله مکانیابی-مسیریابی ارائه شد. جواب مسئله تعیین می‌کند که کالاها چگونه در شبکه جریان دارند. بر اساس این جریان، تعداد وسایل نقلیه را نیز می‌توان با حل یک زیر مسئله بدست آورد. بعضی نتایج عددی نیز بر روی نمونه‌های مورد آزمون اجرا شدند و نشان داد که الگوریتم پیشنهادی جواب‌های امکان پذیر خوبی را با زمان قابل قبول، پیدا می‌کند.

سانگ و سونگ (۲۰۰۸) این کار را گسترش داده و بهبود کوچکی را در الگوریتم جستجوی ممنوع ایجاد کردند. آنها همچنین یک فرمول مبتنی بر مجموعه‌های پارتیشن‌بندی ارائه کردند و یک الگوریتم شاخه و کران مبتنی بر این فرمولاسیون برای دست‌یابی به جواب دقیق پیشنهاد کردند. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که این الگوریتم نتایج بهتری را به لحاظ تعداد (در مقیاس کوچک) نمونه‌های حل شده ارائه می‌کند و زمان محاسبه مورد نیاز با نتایج بدست آمده با حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح با نرم افزار بهینه سازی CPLEX مقایسه شد.

گوماس<sup>۳</sup> و بوکبندر<sup>۴</sup> (۲۰۰۴) بر روی یک مسئله مشابه مطالعه کردند با این تفاوت که در مطالعه‌ی آنها ناوگان‌های حمل و نقل مستقیم مجاز بوده و انواع محصولات چند گانه در نظر گرفته شده است (چند کالایی). هزینه تسهیلات برای هر سیستم فرابارانداز از هزینه‌های ثابت و

1- Donaldson, H

2- Musa, R.

3- Gümüs

4- Bookbinder, J. H.

هزینه‌های عملیاتی در هر واحد بار، تشکیل شده است. هزینه حمل و نقل نیز از دو جزء تشکیل شده است: هزینه ثابت برای هر کامیون و یک هزینه متغیر برای هر واحد بار در هر واحد مسافت. آخرین هزینه در نظر گرفته شده مربوط به هزینه‌های حمل و نقل موجودی است. در این رویکرد، هماهنگ‌سازی کامیون‌های ورودی و خروجی در نظر گرفته نمی‌شوند. نویسنده‌های این مطالعه، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط از این مسئله را ایجاد کردند. به وسیله حل بهینه‌ی نمونه‌های کوچک مسئله (با نرم‌افزار بهینه‌سازی LINGO و CPLEX) نمونه‌های از چند پارامتر هزینه مورد مطالعه قرار گرفت. نویسندگان نتیجه گرفتند که تعداد بهینه سیستم‌های فرابارانداز یک تابع صعودی از نرخ بین هزینه‌های ثابت کامیون‌ها و هزینه‌های ثابت تسهیلات می‌باشد.

یک رویکرد متفاوت توسط جیرمان<sup>۱</sup> و روس<sup>۲</sup> (۲۰۰۳) بررسی شد و آن‌ها بر روی یک مسئله‌ی چند رده‌ای مطالعه کردند که در آن کالاها (از خانواده چندمحصولی) باید بود از کارخانجات تولیدی مرکزی به یک یا تعداد بیشتری مراکز توزیع منتقل می‌شدند و از آنجا به وسیله‌ی مراکز فرابارانداز به مشتریان می‌رسیدند. این مسئله در دو مرحله بررسی می‌شود. در مرحله اول، یک مدل استراتژیک برای انتخاب بهترین مجموعه مکان‌های مراکز توزیع و سیستم‌های فرابارانداز، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نویسندگان یک فرمولاسیون برنامه‌ریزی عدد صحیح که هدف آن حداقل‌سازی هزینه‌های ثابت مربوط عملیات برپایی مراکز توزیع و سیستم‌های فرابارانداز است و همچنین هزینه‌های متغیر حمل و نقل، را فراهم کردند. در مرحله دوم، یک مدل عملیاتی در رابطه با هر مقدار از هر نوع محصول که لازم است به وسیله‌ی مراکز توزیع و فرابارانداز حمل و نقل شود، تصمیم‌گیری می‌کند. این مدل در تلاش است تا هزینه‌های حمل و نقل را در حالی که تقاضای مشتری ارضا شود حداقل کند. این مدل نسبت به مدل اول محدودیت کمتری دارد و می‌تواند یکبار به بازگشایی مراکز توزیع پردازد و فراباراندازها با کمک اولین مدل تعیین می‌شوند. هر دو مدل در مقایسه با روش‌های قبلی خیلی ساده‌تر هستند. نویسنده یک رویکرد شبیه‌سازی تیرید را برای حل نمونه‌های بزرگ

---

1- Jayaraman, V.

2- Ross, A.

مسئله پیشنهاد کردند. آزمایش‌های محاسباتی بر روی نمونه‌های مسئله نشان می‌دهد که الگوریتم فراابتکاری نتایجی با انحراف حدود ۴٪ از جواب بهینه اما ۳۰۰ الی ۴۰۰ بار سریعتر، ارائه می‌کند.

این نویسندگان (روس و جیرمان، ۲۰۰۸)، دو الگوریتم اکتشافی دیگر را در برخورد با این مسئله ارائه کردند. هر دو الگوریتم فراابتکاری بر اساس شبیه‌سازی تبرید هستند اما از یک مکانیزم اضافی برای جلوگیری از افتادن در راه‌حل‌های بهینه محلی، استفاده می‌کنند. الگوریتم اول از لیست ممنوع استفاده می‌کند، و الگوریتم دوم یک مقیاس‌گذاری دوباره و ناگهانی را برای دمای سیستم مجاز می‌داند.

محتشمی و فلاحیان (۱۳۹۲) در مقاله‌ی خود بر روی بهینه‌سازی برنامه ریزی کامیون‌های ورودی و خروجی با هدف حداقل‌سازی مدل تک هدفه زمان کل عملیات داخلی زنجیره تامین تمرکز کردند. زمان بندی حمل و نقل در مقاله آنها، زمان بین مبداها و مقصدها، زمان تخلیه و بارگیری و جایجایی محصولات را کمینه‌سازی می‌نماید. با توجه به اینکه مدل مقاله آنها از نوع صفر و یک و NP-hard بود، برای پیدا کردن جواب‌های نزدیک بهینه مساله از الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی گروه ذرات استفاده شده است. سپس این الگوریتم‌ها با معیارهایی همچون زمان اجرا و کیفیت جواب‌ها با یکدیگر مقایسه شد. نتایج به دست آمده از لحاظ مقایسه سرعت زمان اجرا نشان داد که الگوریتم ژنتیک زمان کمتری را برای حل مساله به کار می‌برد. از لحاظ کیفیت نتایج، هر دو الگوریتم جواب‌های نسبتاً قابل قبولی را ارائه می‌دهند.

موسوی و توکلی مقدم (۲۰۱۳) نیز مدلی را برای مسئله مکانیابی-مسیریابی سیستم‌های فرابارانداز که از دو مرحله تشکیل شده است، ارائه نمودند. یک مرحله برای مکانیابی فراباراندازها و دیگری برای مسیریابی وسایل نقلیه. آنها یک مدل MIP دو مرحله‌ای را برای مکانیابی مراکز فرابارانداز و مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن این مراکز و با توجه به کاربردهای بالقوه در شبکه‌های توزیع پیشنهاد کردند. سپس، یک الگوریتم جدید بر اساس الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید دو مرحله‌ای با لیست ممنوع برگرفته از الگوریتم جستجوی

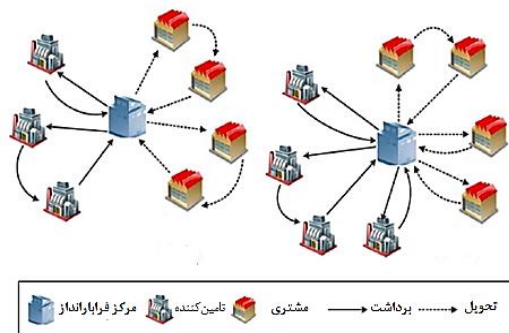
ممنوع، برای حل مدل ارائه شده، پیشنهاد شد. الگوریتم پیشنهادی آنها نه تنها مانع از بازبینی راه‌حل‌ها نمی‌شد بلکه ماهیت تصادفی آن را نیز حفظ می‌کرد. در نهایت، مسائل با اندازه کوچک و بزرگ به صورت تصادفی تولید شده و توسط الگوریتم پیشنهادی حل شدند. نتایج عددی برای مسائل مختلف نشان داد که این الگوریتم به خوبی عمل کرده و همگرایی سریعی به راه‌حل‌های مناسب دارد.

در مقاله ای دیگر موسوی و توکلی مقدم (۲۰۱۴) دو مدل جدید و قطعی برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط را به صورت یکپارچه برای مکان یابی مراکز متعدد فرابارانداز و زمان بندی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ارائه کردند. علاوه براین آنها یک روش برنامه ریزی فازی احتمالاتی-تصادفی ترکیبی را در تلاش برای ترکیب دو نوع عدم قطعیت در مدل‌های برنامه ریزی ریاضی پیشنهاد کردند. روش حل آنها به صراحت توانست ابهامات و پیچیدگی‌های موجود در تبدیل مدل ریاضی با پارامترهای غیر قطعی به یک مدل قطعی را برطرف کند.

#### تعریف مسئله

یک مرکز فرابارانداز گره‌ای میانی در شبکه‌های توزیع به منظور کاهش موجودی است که احتیاجات مشتریان را برآورده می‌کند. از طریق سیستم‌های فرابارانداز، کالاهای مختلف توسط وسایل نقلیه ورودی به مراکز مربوطه تحویل داده می‌شوند. کالاهای بلافاصله براساس مقاصد، تلفیق شده و سپس توسط وسایل نقلیه خروجی برای تحویل به مشتریان برای مدت کوتاهی تحویل داده می‌شوند تا ذخیره‌سازی موجودی را محدود کنند. از این رو پرهزینه‌ترین جزء در شبکه‌های توزیع را می‌توان کاهش داد. در واقع سیستم‌های فرابارانداز به عنوان یک استراتژی جدید لجستیک برای شرکت‌ها معرفی شده‌اند که در سال‌های اخیر با صنایع توزیع، خرده‌فروشی، مواد غذایی، نوشیدنی‌ها و غیره، مرتبط بوده‌اند (موسوی و توکلی مقدم، ۲۰۱۳). شکل ۱ مفهوم شبکه توزیع سیستم‌های فرابارانداز را نشان می‌دهد که در آن دو گره اصلی (گره‌های تحویل و برداشت) ورودشان هم زمان و ادغامی هستند. شبکه توزیع مورد بحث در این مقاله تک دوره‌ای، چند محصولی و سه رده‌ای می‌باشد که رده‌های آن عبارتند از تامین-کنندگان، مراکز فرابارانداز و مشتریان.





شکل ۱. شبکه توزیع فرابارانداز در زنجیره تامین (موسوی و توکلی مقدم، ۲۰۱۳).

مسئله مکانیابی-مسیریابی مراکز فرابارانداز در زنجیره تامین را می توان به شرح زیر بیان کرد: یک مجموعه از مشتریان با تقاضای مشخص و مجموعه ای از مراکز فرابارانداز وجود دارند. مکانیابی مراکز فرابارانداز در مرحله اول تعیین می شود. محصولات باید از طریق مراکز فرابارانداز به مشتریان تحویل داده شوند. حمل و نقل مربوط به هریک از تقاضاهای مشتریان توسط وسایل نقلیه موجود در فرآیند تحویل دهی انجام شده که از مراکز فرابارانداز و عملیات و مسیرهای مربوط به چندین مشتری عبور می کنند. سپس مسیریابی وسیله نقلیه در فرآیندهای برداشت و تحویل به منظور حداقل سازی هزینه های کلی صورت می گیرد. در مرحله اول، هزینه های ثابت مربوط به بازگشایی مراکز فرابارانداز در مکان های بالقوه همراه با هزینه های حمل و نقل برای جابجایی محصولات از تامین کننده به مراکز فرابارانداز و از آنجا به مشتریان، در نظر گرفته شده است. همچنین از آنجایی که ظرفیت مراکز فرابارانداز محدود است و اضافه ظرفیت با پرداخت جریمه امکان پذیر می باشد، هزینه های جریمه نیز در تابع هدف در نظر گرفته شده است. علاوه بر این در مرحله دوم، هزینه های توزیع مرتبط با مسیریابی وسایل نقلیه شامل هزینه های عملیاتی وسایل نقلیه و هزینه های حمل و نقل هستند. در مجموع، برنامه ی مسیریابی و توزیع با مراکز چندگانه فرابارانداز را می توان طوری طراحی کرد که تقاضای هر کدام از مشتریان برآورده شود. در این مسئله امکان تقسیم بار<sup>۱</sup> وجود دارد و تقاضای هر مشتری می تواند توسط بیش از یک کامیون ارضا شود. تعداد وسایل نقلیه در فرآیندهای

1- Split deliveries

برداشت و تحویل محدود است. علاوه بر این، در این مسئله فرض شده است که همه‌ی وسایل نقلیه در مراکز فرابارانداز مستقر هستند. مقدار انتقال داده شده در هر مسیر کمتر یا مساوی ظرفیت هر وسیله نقلیه است. هر مسیر در فرآیند برداشت و تحویل از یک مرکز فرابارانداز شروع و به آن خاتمه می‌یابد. همچنین مقدار کل برداشت‌ها باید مساوی با مقدار تحویل‌ها باشد.

در نهایت، هدف از مدل MIP دو مرحله‌ای، دستیابی به حداقل تعداد مراکز فرابارانداز در میان مجموعه‌ای از مکان‌ها (گسسته) در مرحله اول، و سپس دستیابی به بهترین مسیر و همچنین زمان رسیدن هر وسیله نقلیه به گره‌های شبکه‌ی توزیع و مراکز فرابارانداز است. در ادامه به بررسی مدل ریاضی مسئله مربوطه می‌پردازیم که مدلی توسعه یافته از مدل موسوی و توکلی مقدم (۲۰۱۳) است. مدل موسوی و توکلی مقدم (۲۰۱۳) تک محصولی بود، و امکان تقسیم بار وجود نداشت و تقاضای هر مشتری تنها توسط یک کامیون برآورده می‌شد. همچنین در مدل موسوی و توکلی مقدم (۲۰۱۳) اضافه ظرفیت مجاز نبود که محدودیت‌هایی را ایجاد می‌کرد، اما در مدل MIP حاضر برای اضافه ظرفیت مراکز فرابارانداز جریمه‌ای در نظر گرفته شده است که در تابع هدف به عنوان هزینه‌های سیستم لحاظ می‌شود. همچنین در مدل پیشنهادی در این پژوهش برای هر مشتری موعد تحویل در نظر گرفته شده است. به طور کلی در این پژوهش سعی شده است که مدل‌سازی مسئله به دنیای واقعی نزدیکتر و از این رو کاربردی‌تر باشد.

#### شاخص‌ها و مجموعه‌ها

$R$ : مجموعه محصولات.

$M$ : مجموعه مشتریان.

$N$ : مجموعه تامین‌کنندگان.

$O$ : مجموعه مراکز فرابارانداز.

$K$ : مجموعه وسایل نقلیه در فرآیند برداشت برای هر فرابارانداز.

$K'$ : مجموعه وسایل نقلیه در فرآیند تحویل برای هر فرابارانداز.

$r$ : شاخص محصول و مقدار آن از ۱ تا  $R$ .

$j$  و  $i$ : شماره تامین کننده و مقدار آن از ۱ تا  $N$ .

$j'$  و  $i'$ : شماره مشتریان و مقدار آن از ۱ تا  $M$ .

$p$ : شماره مرکز فرابارانداز و مقدار آن از ۱ تا  $O$ .

### پارامترها

$CA_{pr}$ : ماکزیم ظرفیت مرکز فرابارانداز  $p$  برای محصول  $r$

$S_{ir}$ : مقدار محصول از نوع  $r$  که توسط تامین کننده  $i$  تامین می شود.

$D_{i'r}$ : تقاضای مشتری  $i'$  برای محصول  $r$

$W_{pr}$ : هزینه جریمه مربوط به مازاد ظرفیت محصول  $r$  در فرابارانداز  $p$

$F_p$ : هزینه ثابت بازگشایی فرابارانداز  $p$

$C_{ipr}$ : هزینه حمل محصول  $r$  از نقطه  $i$  به  $p$  در فرآیند برداشت.

$C'_{p i' r}$ : هزینه حمل محصول  $r$  از نقطه  $p$  به  $i'$  در فرآیند تحویل.

$TC$ : ماکزیم کل هزینه‌ای که می توان به بازگشایی مراکز فرابارانداز اختصاص داد.

$QW_k$ : ماکزیم ظرفیت وزنی کامیون  $k$  در فرآیند برداشت.

$QV_k$ : ماکزیم ظرفیت حجمی کامیون  $k$  در فرآیند برداشت.

$QW'_k$ : ماکزیم ظرفیت وزنی کامیون  $k'$  در فرآیند تحویل.

$QV'_k$ : ماکزیم ظرفیت حجمی کامیون  $k'$  در فرآیند تحویل.

$UW_r$ : واحد وزنی هر محصول  $r$ .

$UV_r$ : واحد حجمی هر محصول  $r$ .

$du_{i'}$ : بازه زمانی موعد تحویل برای مشتری  $i'$  نام که در آن  $a_{i'}$  زودترین زمانی

است که مشتری  $i'$  نام می تواند محصول مورد نظر را تحویل بگیرد، و  $b_{i'}$  دیرترین زمانی

است که باید محصول به مشتری  $i'$  نام تحویل داده شود.

$C_k$ : هزینه عملیاتی کامیون‌های  $k$  در فرآیند برداشت.

$C'_{k'}$ : هزینه عملیاتی کامیون‌های  $k'$  در فرآیند تحویل.  
 $Ser_i$ : زمان خدمت‌دهی نقطه  $i$  در فرآیند برداشت.  
 $Ser'_{i'}$ : زمان خدمت‌دهی نقطه  $i'$  در فرآیند تحویل.  
 $C_{i,j}$ : هزینه حمل و نقل از نقطه  $i$  به  $j$  در فرآیند برداشت.  
 $C'_{i',j'}$ : هزینه حمل و نقل از نقطه  $i'$  به  $j'$  در فرآیند تحویل.  
 $d_{i,j}$ : فاصله مکانی نقطه  $i$  تا  $j$  در فرآیند برداشت.  
 $d'_{i',j'}$ : فاصله مکانی نقطه  $i'$  تا  $j'$  در فرآیند تحویل.  
 $t_{i,j}$ : فاصله زمانی حمل و نقل از نقطه  $i$  به  $j$  در فرآیند برداشت.  
 $t'_{i',j'}$ : فاصله زمانی حمل و نقل از نقطه  $i'$  به  $j'$  در فرآیند تحویل.  
 $P_{ir}$ : مقدار برداشت محصول  $r$  در نقطه  $i$  در فرآیند برداشت.  
 $D_{i'r}$ : مقدار تحویل محصول  $r$  در نقطه  $i'$  در فرآیند تحویل.

## متغیرها

$x_{ipr}$ : اگر محصول  $r$  از نقطه  $i$  به نقطه  $p$  برود  
 در غیر این صورت  
 $y_{pi'r}$ : اگر محصول  $r$  از نقطه  $p$  به نقطه  $i'$  برود  
 در غیر این صورت  
 $Z_p$ : اگر مرکز فرابارانداز  $p$  باز باشد  
 در غیر این صورت

$H_{ipr}$ : مقدار محصول انتقال یافته نوع  $r$  از نقطه  $i$  به فربارانداز  $p$  در فرآیند برداشت.  
 $H'_{pi'r}$ : مقدار محصول انتقال یافته نوع  $r$  از فربارانداز  $p$  به نقطه  $i'$  در فرآیند تحویل.

$x_{ijk}$ : اگر کامیون  $k$  در فرآیند برداشت از نقطه  $i$  به  $j$  برود  
 در غیر این صورت  
 اگر کامیون  $k$  در فرآیند تحویل از نقطه  $i'$  به  $j'$  برود  
 در غیر این صورت

$x'_{ij'k}$

$y_{ijrk}$ : مقدار انتقال یافته محصول  $r$  از نقطه  $i$  به  $j$  توسط کامیون  $k$  در فرآیند برداشت.  
 $y'_{i'j'r'k}$ : مقدار انتقال یافته محصول  $r$  از نقطه  $i'$  به  $j'$  توسط کامیون  $k'$  در فرآیند تحویل.  
 $DT_{ik}$ : زمان حرکت (ترک) کامیون  $k$  از نقطه  $i$  در فرآیند برداشت.  
 $DT'_{i'k'}$ : زمان حرکت (ترک) کامیون  $k'$  از نقطه  $i'$  در فرآیند تحویل.  
 $DT_{jk}$ : زمان حرکت (ترک) کامیون  $k$  از نقطه  $j$  در فرآیند برداشت.  
 $DT'_{j'k'}$ : زمان حرکت (ترک) کامیون  $k'$  از نقطه  $j'$  در فرآیند تحویل.  
 $AT_{jk}$ : زمان رسیدن کامیون  $k$  به نقطه  $j$  در فرآیند برداشت.  
 $AT_{pk}$ : زمان رسیدن کامیون  $k$  به فرابارانداز  $p$  در فرآیند برداشت.  
 $AT'_{j'k'}$ : زمان رسیدن کامیون  $k'$  به نقطه  $j'$  در فرآیند تحویل.  
 $AT'_{pk'}$ : زمان رسیدن کامیون  $k'$  به فرابارانداز  $p$  در فرآیند تحویل.

مدل دو مرحله‌ای پیشنهادی

$$\begin{aligned} \min Z1 = & \sum_{p=1}^O F_p Z_p + \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^O \sum_{r=1}^R C_{ipr} x_{ipr} \\ & + \sum_{p=1}^O \sum_{i'=1}^M \sum_{r=1}^R C'_{pi'r} y_{pi'r} \\ & + \sum_{p=1}^O \sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^R W_{pr} (H_{ipr} x_{ipr} - CA_{pr}) \end{aligned} \quad (1)$$

St:

$$\sum_{i'=1}^M D_{i'r} \leq \sum_{i=1}^N S_{ir} \quad \forall r \quad (2)$$

$$\sum_{p=1}^O y_{pi'r} = 1 \quad \forall r, i' \quad (3)$$

$$\sum_{r=1}^R y_{pi'r} = (R)y_{pi'1} \quad \forall p, i' \quad (4)$$

$$\sum_{p=1}^O F_p Z_p \leq TC \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N H_{ipr} x_{ipr} = \sum_{i'=1}^M H'_{pi'r} y_{pi'r} \quad \forall r, p \quad (6)$$

$$\sum_{p=1}^O H'_{pi'r} y_{pi'r} = D_{i'r} \quad \forall r, i' \quad (7)$$

$$\forall r, i \quad \sum_{p=1}^O H_{ipr} x_{ipr} \leq S_{ir} \quad (8)$$

$$H_{ipr} \leq S_{ir} \times x_{ipr} \quad \forall i, p, r \quad (9)$$

$$H'_{pi'r} = D_{i'r} \times y_{pi'r} \quad \forall p, i', r \quad (10)$$

$$x_{ipr} \leq Z_p \quad \forall i, p, r \quad (11)$$

$$y_{pi'r} \leq Z_p \quad \forall p, i', r \quad (12)$$

$$x_{ipr}, y_{pi'r}, Z_p \in \{0,1\}, \quad H_{ipr}, H'_{pi'r} \geq 0 \quad (13)$$

تابع هدف (۱) هزینه‌های ثابت بازگشایی مراکز فرابارانداز و هزینه‌های انتقال محصول از تامین‌کننده به این مراکز و از آنجا به مشتریان را برای تامین تقاضای مشتری، و همچنین هزینه‌های مربوط به ظرفیت مازاد هر مرکز فرابارانداز را، حداقل می‌کند. محدودیت (۲) تضمین می‌کند که مجموع تقاضای مشتریان برای هر محصول از مجموع محصولاتی که توسط تامین‌کنندگان ارائه می‌شود کمتر است. محدودیت (۳) و (۴) نشان می‌دهند که تقاضای هر مشتری در فرآیند تحویل تنها توسط یک مرکز فرابارانداز تامین می‌شود، به عبارتی هر مشتری تنها به یک مرکز فرابارانداز تخصیص داده می‌شود. محدودیت (۵)

ماکزیمم هزینه کل که می‌توان برای بازگشایی مراکز فرابارانداز صرف کرد را در نظر می‌گیرد. محدودیت (۶)، نشان می‌دهد که مجموع مقادیر انتقال یافته بین نقاط در فرآیند تحویل باید با مجموع مقادیر انتقال یافته بین نقاط در فرآیند برداشت برابر باشد. محدودیت (۷)، تضمین می‌کند که مجموع مقادیر انتقال داده شده به هر مشتری برابر با تقاضای هر مشتری است. محدودیت (۸) بیان می‌دارد که مجموع مقادیر برداشت شده از هر تامین‌کننده کمتر یا مساوی مقداری است که هر تامین‌کننده قادر به تامین آن می‌باشد. محدودیت (۹) تضمین می‌کند که اگر مسیری بین تامین‌کننده و مرکز فرابارانداز در فرآیند برداشت وجود نداشته باشد، هیچ محصولی انتقال پیدا نمی‌کند، و همچنین به طور مشابه محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که اگر مسیری بین مرکز فرابارانداز و مشتری در فرآیند تحویل وجود نداشته باشد، هیچ محصولی انتقال پیدا نمی‌کند. محدودیت (۱۱) بیان می‌دارد که در فرآیند برداشت، حرکت محصولات از تامین‌کننده به فرابارانداز، تنها زمانی می‌تواند صورت گیرد که مرکز فرابارانداز مربوطه باز باشد، و به طور مشابه محدودیت (۱۲)، نشان می‌دهد که در فرآیند تحویل، حرکت محصولات از مرکز فرابارانداز به مشتری، تنها زمانی می‌تواند صورت گیرد که مرکز فرابارانداز مربوطه باز باشد. محدودیت (۱۳) متغیرهای تصمیم مربوط به مدل را تعریف می‌کند.

در مرحله دوم، پارامترها و موارد تعریف شده در قسمت قبل، برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن چندین مرکز فرابارانداز استفاده می‌شوند. مسئله مسیریابی را می‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی کرد:

$$\begin{aligned}
\min Z_2 = & \sum_{i \in N} \sum_{j \in (NUO)} \sum_{k \in K} (C_{ij} d_{ij}) x_{ijk} \\
& + \sum_{i \in O} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} [(C_{ij} d_{ij}) + C_k] x_{ijk} \\
& + \sum_{i' \in M} \sum_{j' \in (MUO)} \sum_{k' \in K'} (C'_{i'j'} d'_{i'j'}) x_{i'j'k'} \\
& + \sum_{i' \in O} \sum_{j' \in M} \sum_{k' \in K'} [(C'_{i'j'} d'_{i'j'}) + C_{k'}] x_{i'j'k'}
\end{aligned} \tag{۱۴}$$

St:

$$\sum_{i \in (NUO)} \sum_{k \in K} x_{ijk} \geq 1 \quad \forall j \tag{۱۵}$$

$$\sum_{j \in (NUO)} \sum_{k \in K} x_{ijk} \geq 1 \quad \forall i \tag{۱۶}$$

$$\sum_{i' \in (MUO)} \sum_{k' \in K'} x'_{i'j'k'} \geq 1 \quad \forall j' \tag{۱۷}$$

$$\sum_{j' \in (MUO)} \sum_{k' \in K'} x'_{i'j'k'} \geq 1 \quad \forall i' \tag{۱۸}$$

$$\sum_{i \in (NUO)} \sum_{k \in K} x_{ijk} \geq 1 \quad \forall j \in O \tag{۱۹}$$

$$\sum_{i' \in (MUO)} \sum_{k \in K} x'_{i'j'k'} \geq 1 \quad \forall j' \in O \tag{۲۰}$$

$$\sum_{i \in (NUO)} x_{ilk} = \sum_{j \in (NUO)} x_{ijk} \quad \forall k, l \in (N \cup O) \tag{۲۱}$$

$$\sum_{i' \in (MUO)} x'_{i'l'k'} = \sum_{j' \in (MUO)} x'_{l'j'k'} \tag{۲۲}$$

$$\forall k', l' \in (M \cup O)$$

$$\sum_{r \in R} U w_r \times Y_{ijrk} \leq Q w_k \tag{۲۳}$$

$$\forall k, i, j \in (N \cup O)$$



$$\sum_{r \in R} Uv_r \times Y_{ijrk} \leq Qv_k \quad \forall k, i, j \in (N \cup O) \quad (24)$$

$$\sum_{r \in R} Uw_r \times Y'_{i'j'r k'} \leq Qw'_{k'} \quad \forall k', i', j' \in (M \cup O) \quad (25)$$

$$\sum_{r \in R} Uv_r \times Y'_{i'j'r k'} \leq Qv'_{k'} \quad \forall k', i', j' \in (M \cup O) \quad (26)$$

$$\sum_{j \in (N \cup O)} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq K \quad \forall i \in (N \cup O) \quad (27)$$

$$\sum_{j' \in (M \cup O)} \sum_{k' \in K'} x'_{i'j'k'} \leq K' \quad \forall i' \in (M \cup O) \quad (28)$$

$$\sum_{j \in (N \cup O)} \sum_{k \in K} (Y_{ijrk} \times x_{ijk}) = P_{ir} \quad \forall r, i \quad (29)$$

$$\sum_{i' \in (M \cup O)} \sum_{k' \in K'} (Y'_{i'j'r k'} \times x'_{i'j'k'}) = D_{j'r} \quad \forall r, j' \quad (30)$$

$$Y_{ijrk} \leq P_{ir} \times x_{ijk} \quad \forall k, r, i, j \in (N \cup O) \quad (31)$$

$$Y'_{i'j'r k'} \leq D_{j'r} \times x'_{i'j'k'} \quad \forall k', r, i', j' \in (M \cup O) \quad (32)$$

$$a_{i'} \leq AT'_{i'k'} \leq b_{i'} \quad \forall k', i' \quad (33)$$

$$DT_{jk} \geq (t_{ij} + DT_{ik} + ser_j)x_{ijk} \quad \forall k, i, j \in (N \cup O) \quad (34)$$

$$DT'_{j'k'} \geq (t'_{i'j'} + DT'_{i'k'} + ser'_{j'})x'_{i'j'k'} \quad \forall k', i' \in (M \cup O), j' \quad (35)$$

$$AT_{jk} \geq (t_{ij} + DT_{jk})x_{ijk} \quad \forall k, i, j \in (N \cup O) \quad (36)$$

$$AT'_{j'k'} \geq (t_{i'j'} + DT_{i'k'})x'_{i'j'k'} \quad \forall k, i' \quad (37)$$

$$\in (M \cup O), j'$$

$$x_{ijk} + x_{jik} \leq 1 \quad \forall k, i, j \in (N \cup O) \quad (38)$$

$$x'_{i'j'k'} + x'_{j'i'k'} \leq 1 \quad \forall k', i', j' \quad (39)$$

$$\in (M \cup O)$$

$$AT_{pk}, Y_{ijk}, Y'_{i'j'rk'} \geq 0, AT'_{i'k'}, DT_{ik}, AT_{ik}, DT'_{i'k'}, DT_{pk} \quad (40)$$

$$\forall k', k, i', i, j', j, p$$

$$\forall k', k, i', i, j', j \quad X_{ijk}, X'_{i'j'k'} \in \{0, 1\} \quad (41)$$

تابع هدف (۱۴) هزینه‌های حمل و نقل مرتبط با انتقال محصولات در فرآیندهای برداشت و تحویل، و همچنین هزینه‌های عملیاتی هر وسیله نقلیه در این دو فرآیند را حداقل می‌کند. محدودیت‌های (۱۵) تا (۲۰) امکان تقسیم بار را بیان می‌کند که با وجود این محدودیت‌ها بیش از یک کامیون می‌تواند از هر گره در فرآیند تحویل و برداشت عبور کند. دو محدودیت (۲۱) و (۲۲) توالی حرکت کامیون‌ها را به ترتیب در فرآیندهای برداشت و تحویل تضمین می‌کنند. از آنجایی که هر کامیون برای حمل بار ظرفیت وزنی و حجمی محدودی دارد، محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) تضمین می‌کنند که در فرآیند برداشت، به ترتیب وزن و حجم کلی بارها از ظرفیت وزنی و حجمی وسایل نقلیه تجاوز نکند، همچنین به طور مشابه محدودیت‌های (۲۵) و (۲۶) تضمین می‌کنند که در فرآیند تحویل، به ترتیب مجموع وزن و حجم بارها از ظرفیت وزنی و حجمی وسایل نقلیه تجاوز نکند. محدودیت (۲۷) در نظر می‌گیرد که مجموع وسایل نقلیه‌ای که در فرآیند برداشت به مراکز فرابارانداز می‌رسند باید کمتر از تعداد وسایل نقلیه موجود باشد، و به طور مشابه محدودیت (۲۸) در نظر می‌گیرد که کل وسایل نقلیه‌ای که در فرآیند تحویل، مراکز فرابارانداز را ترک می‌کنند باید کمتر از تعداد وسایل نقلیه موجود باشد. تعداد کالاهایی که بین نقاط در فرآیندهای تحویل و برداشت بارگذاری، باربرداری و انتقال داده می‌شوند، در محدودیت‌های (۲۹) و (۳۰) در نظر گرفته شده‌اند. محدودیت (۳۱) تضمین می‌کند که اگر در فرآیند برداشت مسیری بین نقاط  $i$  و  $j$  وجود نداشته باشد، هیچ محصولی انتقال پیدا نمی‌کند، همچنین محدودیت (۳۲) تضمین می‌-

کند که اگر در فرآیند برداشت بین نقاط  $i'$  و  $j'$  مسیری وجود نداشته باشد، هیچ محصولی انتقال پیدا نمی‌کند. محدودیت (۳۳) تضمین می‌کند که وسایل نقلیه در فرآیند تحویل در بازه زمانی مشخصی به یک نقطه می‌رسند. محدودیت‌های (۳۴) و (۳۵) نشان می‌دهند که به ترتیب در فرآیندهای برداشت و تحویل، زمانی که هر کامیون هر نقطه را ترک می‌کند از مجموع زمان رسیدن هر کامیون به آن نقطه، زمان خدمت‌دهی و زمان لازم برای حرکت بین دو نقطه بدست می‌آید. زمان رسیدن هر کامیون به هر نقطه در فرآیندهای تحویل و برداشت نیز به ترتیب توسط محدودیت‌های (۳۶) و (۳۷) بیان شده است. محدودیت‌های (۳۸) و (۳۹) نیز از ایجاد حلقه به ترتیب در فرآیند تحویل و برداشت جلوگیری می‌کنند. و در آخر محدودیت‌های (۴۰) و (۴۱) متغیرهای تصمیم مدل را تعریف کرده‌اند.

### الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی

از آنجایی که مسئله مکانیابی-مسیریابی یک مسئله NP-hard است با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل آن به شکل نمایی افزایش می‌یابد. برای کاهش زمان محاسباتی در مسائلی با ابعاد بزرگتر، سه رویکرد فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی و ازدحام ماهی‌های مصنوعی و ترکیب این دو الگوریتم برای حل این مسئله پیشنهاد شده است. علاوه بر این، مسئله مکانیابی-مسیریابی تعریف شده در این پژوهش با استفاده از الگوریتم پیشنهادی موسوی و توکلی مقدم (۲۰۱۳) نیز که ترکیبی از الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید و جستجوی ممنوع است، حل می‌شود. جهت پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها لازم است مقدماتی فراهم شود، که در ادامه به تشریح هریک از این موارد می‌پردازیم.

به طور کلی، سیستم‌های ایمنی مصنوعی جزء الگوریتم‌های الهام گرفته شده از بیولوژی هستند. این نوع الگوریتم‌ها، الگوریتم‌هایی کامپیوتری هستند که اصول و ویژگی‌های آنها نتیجه بررسی در خواص وقتی و مقاومت نمونه‌های بیولوژیکی است. سیستم ایمنی مصنوعی نوعی الگو برای یادگیری ماشین است. یادگیری ماشین، توانایی کامپیوتر برای انجام یک کار

با یادگیری داده‌ها یا از روی تجربه است. سیستم ایمنی مصنوعی توسط کاسترو به صورت زیر تعریف شده است:

«سیستم‌های وقتی که با الهام از ایمونولوژی نظری و توابع، اصول و مدل‌های ایمنی مشاهده شده به وجود آمده‌اند و برای حل مسائل مورد استفاده قرار می‌گیرند.»

دی کاسترو<sup>۱</sup> و تیمیس<sup>۲</sup> (۲۰۰۲) تعریف بالا را برای AIS برگزیده-اند و سه نکته را برشمردند که در هر الگوریتم ایمنی مصنوعی باید لحاظ شود:

۱. در هر الگوریتم ایمنی مصنوعی، حداقل باید یک جزء ایمنی مانند لئوسیت-ها وجود داشته باشد.

۲. در هر الگوریتم ایمنی مصنوعی باید ایده‌ای برگرفته از بیولوژی نظری یا تجربی استفاده شود.

۳. الگوریتم ایمنی مصنوعی طراحی شده باید به حل مسئله‌ای کمک کند.

بر اساس این سه ضابطه، دیکاسترو و تیمیس (۲۰۰۲)، اولین الگوریتم‌های ایمنی مصنوعی را در سال ۱۹۸۶ طراحی کردند. در همان سال فارمر مدلی برای تئوری شبکه ایمنی ارائه کرد و بر اساس این مدل اعلام کرد که "سیستم ایمنی قادر به یادگیری، به خاطر سپردن و تشخیص الگوست." بعد از ادعای فارمر<sup>۳</sup> (فارمر و همکاران، ۱۹۸۶)، توجه به AIS به عنوان یک مکانیزم یادگیری ماشین شروع شد. پس از آن به تدریج AIS، در زمینه‌های مختلف وفق پذیر و جذاب بودن خود را نشان داد. سیستم ایمنی علاوه بر توانایی تشخیص الگو، صفات دیگری از قبیل یادگیری، حافظه، خود سازماندهی و از منظر مهندسی، خصوصیات دیگری مانند تشخیص بی‌قاعدگی، تحمل خطا، توزیع پذیری و مقاومت بالا نیز دارد که در صورتی که AIS به طور صحیح ایجاد شود، AIS هم دارای این ویژگی‌ها خواهد بود.

1- De Castro, L. N.

2- Timmis, J.

3- Farmer, J. D.

الگوریتم دسته ماهی‌های مصنوعی نیز یکی از الگوریتم‌های هوش جمعی است که بر اساس جمعیت و جستجوی تصادفی کار می‌کند. این الگوریتم در سال ۲۰۰۲ توسط دکتر لی ژیاو لی<sup>۱</sup> (لی ژیاو لی و همکاران، ۲۰۰۲) ارائه گردید. اساس کار AFSA از روی رفتارهای اجتماعی ماهی‌ها برگرفته شده و بر مبنای جستجوی تصادفی، جمعیت و رفتارگرایی کار می‌کند. این الگوریتم دارای خصوصیتی از جمله سرعت همگرایی بالا، حساس نبودن به مقادیر اولیه ماهی‌های مصنوعی، انعطاف‌پذیری و تحمل‌پذیری خطا میباشد که آن را برای حل مسائل بهینه‌سازی قابل قبول می‌کند.

اساس کار AFSA بر پایه‌ی توابعی است که از رفتارهای اجتماعی دسته‌ی ماهی‌ها در طبیعت برگرفته شده‌اند. در دنیای زیر آب، ماهی‌ها می‌توانند مناطقی را پیدا کنند که دارای غذای بیشتری است، که این امر با جستجوی فردی یا گروهی ماهی‌ها محقق می‌شود. مطابق با این ویژگی، مدل ماهی مصنوعی با رفتارهای حرکت آزادانه، جستجوی غذا، حرکت گروهی و دنباله‌روی ارائه شده است که به وسیله‌ی آنها فضای مسئله جستجو می‌شود.

برای حل مسئله مورد نظر با استفاده از الگوریتم ترکیبی ایمنی مصنوعی و ازدحام ماهی‌های مصنوعی، ابتدا بایستی ساختاری به منظور دستیابی به جواب اولیه شدنی ایجاد نمود. یکی از عوامل تعیین‌کننده‌ی کارایی الگوریتم ایمنی مصنوعی، طراحی سیستم کدگذاری برای نمایش جواب‌ها و تاثیر متقابل کدگذاری است. در این پژوهش با توجه به ساختار الگوریتم ترکیبی ارائه شده لازم است سیستم کدگذاری دارای ساختاری پیوسته باشد. در این راستا با توجه به ماهیت مسئله یک آنتی‌بادی سه رشته‌ای به صورت زیر برای نمایش جواب اولیه ارائه شده است. پس از آن از طریق تابع کدنویسی شده این رشته جواب به ساختار یک جواب قابل درک تبدیل می‌شود. آنتی‌ژن نیز در واقع متغیرهای ورودی مسئله است که شامل تعداد مراکز فرابارانداز، تعداد تامین‌کنندگان، تعداد مشتریان و تعداد محصولات می‌باشد.

---

1- Li Xiao Lei

رشته‌های تعریف شده به صورت زیر هستند:

- رشته نمایش‌دهنده تاسیس یا عدم تاسیس مرکز فرابارانداز

در این رشته به هر مرکز فرابارانداز به صورت تصادفی یک عدد بین ۰ تا ۱ اختصاص می‌یابد. اعداد کمتر از ۰,۵ به معنای عدم تاسیس مرکز فرابارانداز و اعداد بالای ۰,۵ به معنای تاسیس این مرکز می‌باشند. به عنوان مثال در شکل ۲ مراکز فرابارانداز شماره ۱، ۳ و ۵ تاسیس شده اند.

۰,۶	۰,۱۵	۰,۷۴	۰,۲۳	۰,۸	۰,۴۱
-----	------	------	------	-----	------

شکل ۲. رشته جواب تصادفی

- رشته نشان‌دهنده اولویت تامین‌کنندگان و کالاها

این رشته یک ماتریس با اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ است. تعداد سطرهای آن برابر تعداد محصولات به علاوه ۱ و تعداد ستون آن برابر تعداد تامین‌کنندگان است. سطر اول اولویت تامین‌کننده‌ها در بازدید و سطرهای بعدی اولویت محصولات هر تامین‌کننده برای بارگیری و انتقال را نشان می‌دهد. به عنوان مثال در شکل ۳ در سطر اول، ۳ تامین‌کننده داریم که ابتدا تامین‌کننده ۲ و پس از آن تامین‌کننده ۱ و سپس تامین‌کننده ۳ به ترتیب در اولویت بازدید هستند. در سطر دوم اولویت محصول ۱ در بارگیری وسیله نقلیه و سطر سوم اولویت محصول ۲ در بارگیری به ازای هر تامین‌کننده نشان داده شده است.

۰,۴	۰,۷	۰,۳
۰,۲	۰,۵	۰,۴
۰,۴	۰,۹	۰,۳

شکل ۳. ماتریس تصادفی برای اولویت تامین‌کنندگان و کالاها

اولویت مشتری‌ها برای بازدید

در رشته سوم نیز اولویت هر مشتری برای بازدید با اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ نشان داده می‌شود. از آنجایی که تمام تقاضای مشتری‌ها باید برآورده شود لذا این رشته اولویت محصولات برای برآورده شدن را نشان نمی‌دهد. در رشته‌ای که در شکل ۴ نمایش داده شده است، مشتری ۴ در اولویت اول و پس از آن مشتری ۲ در اولویت بازدید است.

۰,۴	۰,۶	۰,۳	۰,۷
-----	-----	-----	-----

شکل ۴. بردار تساوی برای اولویت هر مشتری

همچنین به جهت مقایسه جواب‌های شدنی بدست آمده در هر تکرار الگوریتم بایستی میل پیوندی و یا همان تطابق آنتی‌بادی‌ها و آنتی‌ژن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد که برابر با ارزش تابع هدف مسئله است. با توجه به اینکه تابع هدف مسئله یک تابع کمینه سازی است، بنابراین هرچه قدر مقدار تابع هدف یک عضو از آنتی‌بادی‌ها کمتر باشد آن آنتی‌بادی از میل-پیوندی بالاتری نسبت به سایر جواب‌ها برخوردار است.

### مراحل الگوریتم پیشنهادی

به منظور تولید الگوریتم ترکیبی مورد نظر، الگوریتمی بر اساس گام‌های زیر طراحی شده است. در هر گام از یکی از الگوریتم‌های ایمنی مصنوعی و ازدحام ماهی‌ها بهره برده شده است.

**گام اول:** ایجاد آنتی‌بادی‌های اولیه: این گام بر اساس الگوریتم ایمنی مصنوعی انجام می‌شود. الگوریتم ایمنی مصنوعی جستجو و اکتشاف در فضای جواب را از این جواب‌ها آغاز می‌کند. نحوه تولید جمعیت اولیه در الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف، با توجه به مسئله مورد نظر متفاوت است. در بعضی فراابتکاری‌ها جمعیت اولیه کاملاً به صورت تصادفی تولید می‌شود اما در بعضی دیگر با توجه به خصوصیات مسئله می‌توان از روش‌های دیگری همراه با حفظ خاصیت تصادفی بودن استفاده کرد. همچنین می‌توان درصدی از جمعیت اولیه را کاملاً تصادفی و مابقی را با استفاده از روش‌ها و ابتکارات موجود تولید کرد. در الگوریتم پیشنهادی حاضر جمعیت اولیه کاملاً به صورت تصادفی تولید شده است. جمعیت اولیه آنتی-بادی‌ها (Nsol) برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده، و از آنجایی که این پارامتر یک پارامتر تنظیمی است، می‌تواند تغییر کند.

### گام دوم: برای هر الگوی آنتی‌ژنی مراحل زیر را انجام می‌دهیم:

۱. ارزیابی تطابق آنتی‌بادی با آنتی‌ژن (ارزیابی میل پیوندی): پس از آنکه آنتی‌ژن را به جمعیت آنتی‌بادی‌ها ارائه کردیم، میزان تطابق (میل پیوندی) آن را با هر یک از آنتی‌بادی‌های اولیه می‌سنجیم. میل پیوندی در الگوریتم پیشنهادی، برابر با ارزش تابع هدف مسئله در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه تابع هدف مسئله یک تابع هدف کمینه‌سازی است، بنابراین هرچه مقدار تابع هدف یک عضو از آنتی‌بادی‌ها کمتر باشد آن آنتی‌بادی از میل پیوندی بالاتری نسبت به سایر جواب‌ها برخوردار است.

۲. انتخاب کلونی: تعداد  $nsol$  از آنتی‌بادی‌هایی که بالاترین میل پیوندی را دارند انتخاب می‌کنیم و از این آنتی‌بادی‌ها با توجه به میل پیوندی آنها با آنتی‌ژن‌ها، یک کلونی تولید می‌کنیم: با میل پیوندی بالاتر، تعداد انتشار بیشتر و بالعکس.

**گام سوم:** تولید جواب‌های جدید: در این مرحله از جواب‌هایی که در مرحله قبل انتخاب شده است، جواب‌های جدیدی تولید می‌شود. نحوه تولید جواب‌های جدید از رفتار دنباله‌روی ماهی‌ها در الگوریتم ازدحام ماهی‌ها بهره برده شده است. در این مرحله بر اساس رابطه (۴۲) بهترین جواب با  $X_n$  معرفی شده و مقادیر هر بردار  $X_i$  جواب بر اساس این رابطه تعیین می‌شود. در این رابطه  $Step$  یک پارامتر تنظیمی می‌باشد، که مقدار بهینه آن در این مقاله با استفاده از روش تاگوچی جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی، برابر ۰٫۴ بدست آمده است.

$$\vec{X}_i(t+1) = \vec{X}_i(t) + \frac{\vec{X}_n - \vec{X}_i(t)}{Dis_{i,n}} \times Step \times Rand(0,1) \quad (42)$$

**گام چهارم:** فراجهش: در این مرحله می‌خواهیم نسخه‌های جدیدی که در مرحله قبل از آنتی‌بادی ایجاد کردیم را جهش دهیم به امید اینکه به جواب‌های بهتری برسیم. این فراجهش از رفتار جستجوی غذای ماهی‌ها در الگوریتم ازدحام ماهی‌ها الهام گرفته شده است. در این



جهش یک جواب به تصادف انتخاب شده و  $X_i$  نامیده می‌شود. پس از آن بر اساس رابطه ۴۳ بردار جواب  $X_i$  تغییر پیدا می‌کند.

$$\vec{X}_i(t+1) = \vec{X}_i(t) + \frac{\vec{X}_{Center} - \vec{X}_i(t)}{Dis_{i,Center}} \times Step \times Rand(0,1)$$

فرایند فراجاهش روی تمامی جواب‌ها اعمال نمی‌شود. بلکه هر جواب با احتمال  $Pmute$  وارد فرایند فراجاهش می‌شود. در این قسمت نیز با استفاده از روش تاگوچی، مقدار بهینه ۰٫۹ برای  $Pmute$  بدست آمده است.

**گام پنجم:** جایگزینی: در این مرحله تمام نسخه‌های کپی شده را بر حسب میزان تطابقشان مرتب می‌کنیم و بهترین‌های آنها را برداشته و جایگزین بهترین‌ها در جمعیت اولیه آنتی بادی‌ها می‌کنیم.  
**گام ششم:** به هنگام کردن بهترین جواب یافت شده در این قسمت بهترین جواب جمعیت جدید را بهترین جواب به دست آمده تا کنون مقایسه کرده و اگر بهتر از آن باشد جایگزین بهترین جواب یافت شده می‌شود.

**گام هفتم:** تا وقتی که شرط توقف برقرار نشده است به گام دوم می‌رویم. شرط توقف یک پارامتر تنظیمی می‌باشد که در این الگوریتم رسیدن به تکرار ۱۰۰ به عنوان شرط توقف بهینه بدست آمده است.

نتایج عددی

نتایج محاسباتی در این بخش به منظور بررسی و ارزیابی عملکرد الگوریتم فرابتکاری پیشنهادی برای حل مدل MIP دو مرحله‌ای مکانیابی مراکز فرابارانداز با چند محصول و مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در شبکه توزیع است. بدین منظور، سیزده مسئله نمونه‌ای در محیط زنجیره تامین با اندازه‌های مختلف در اندازه‌های کوچک و بزرگ تولید شده‌اند. از این رو ۷ مسئله نمونه‌ای در اندازه کوچک با روش دقیق و با استفاده از نرم‌افزار گمز برای دو مرحله از مدل پیشنهادی حل می‌شود، که شامل مکانیابی مراکز فرابارانداز در مرحله اول و مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با چند مرکز فرابارانداز در مرحله دوم می‌شود. اندازه‌ی مسائل نمونه‌ای در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. اندازه مسائل نمونه‌ای کوچک

مسئله نمونه-ای	تعداد تأمین-کنندگان	تعداد مراکز فرابارانداز	تعداد مشتریان	تعداد محصولات
مسئله ۱	۲	۲	۳	۲
مسئله ۲	۳	۳	۴	۲
مسئله ۳	۳	۴	۴	۲
مسئله ۴	۴	۵	۵	۳
مسئله ۵	۴	۵	۶	۳
مسئله ۶	۵	۶	۶	۳
مسئله ۷	۵	۶	۷	۳

با توجه به اینکه مسئله مورد بررسی جهت استفاده هیچگونه سابقه‌ای در تحقیقات انجام شده در این حوزه ندارد لازم است داده‌های آزمایشی مسئله به منظور بررسی و اعتبارسنجی مدل ریاضی پیشنهاد شده و همچنین کیفیت نتایج الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی مسئله تولید شوند. تولید داده‌های آزمایشی مسائل نمونه‌ای با اندازه کوچک که برخی از آنها قطعی و مشخص بوده و برخی به صورت تصادفی و مبتنی بر توزیع یکنواخت است، در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۲. تولید داده‌های تصادفی برای مرحله اول مدل مکانیابی-مسیریابی پیشنهادی

پارامتر	مسئله ۱	مسئله ۲	مسئله ۳	مسئله ۴	مسئله ۵	مسئله ۶	مسئله ۷
r	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳
m	۳	۴	۴	۵	۶	۶	۷
n	۲	۳	۳	۴	۴	۵	۵
o	۲	۳	۴	۵	۵	۶	۶
$CA_{pr}$	$\sim U(۸۰,۱۰۰)$	$\sim U(۱۰۰,۱۵۰)$	$\sim U(۱۵۰,۲۰۰)$	$\sim U(۲۵۰,۴۰۰)$	$\sim U(۳۰۰,۴۵۰)$	$\sim U(۴۵۰,۶۰۰)$	$\sim U(۵۵۰,۷۰۰)$
$S_{ir}$	$\sim U(۲۰,۳۵)$	$\sim U(۲۵,۴۵)$	$\sim U(۳۰,۵۰)$	$\sim U(۳۵,۵۵)$	$\sim U(۴۰,۶۰)$	$\sim U(۴۵,۶۵)$	$\sim U(۵۰,۷۰)$
$D_{i'r}$	$\sim U(۵,۱۵)$	$\sim U(۱۰,۲۵)$	$\sim U(۱۰,۳۰)$	$\sim U(۱۵,۳۵)$	$\sim U(۱۵,۳۸)$	$\sim U(۱۵,۴۰)$	$\sim U(۲۰,۴۰)$
$W_{pr}$	$\sim U(۵۰,۳۰۰)$	$\sim U(۵۰,۳۰۰)$	$\sim U(۵۰,۳۰۰)$	$\sim U(۱۰۰,۳۵۰)$	$\sim U(۱۲۰,۳۷۰)$	$\sim U(۱۵۰,۴۰۰)$	$\sim U(۲۰۰,۵۰۰)$
$F_b$	$\sim U(۳۰۰,۴۰۰)$	$\sim U(۵۰۰,۸۰۰)$	$\sim U(۳۰۰,۴۰۰)$	$\sim U(۲۰۰,۶۰۰)$	$\sim U(۴۰۰,۶۰۰)$	$\sim U(۴۰۰,۶۰۰)$	$\sim U(۵۰۰,۶۵۰)$
$C_{ipr}$	$\sim U(۳۰,۱۰۰)$	$\sim U(۵۰,۱۵۰)$	$\sim U(۸۰,۲۵۰)$	$\sim U(۱۰۰,۳۵۰)$	$\sim U(۱۲۰,۴۰۰)$	$\sim U(۱۵۰,۴۰۰)$	$\sim U(۱۵۰,۵۰۰)$
$C_{di'r}$	$\sim U(۳۰,۱۰۰)$	$\sim U(۵۰,۱۵۰)$	$\sim U(۸۰,۲۵۰)$	$\sim U(۱۰۰,۳۵۰)$	$\sim U(۱۲۰,۴۰۰)$	$\sim U(۱۵۰,۴۰۰)$	$\sim U(۱۵۰,۵۰۰)$
TC	$\sim U(۳۰۰۰,۲۰۰۰۰)$	$\sim U(۴۰۰۰,۲۵۰۰۰)$	$\sim U(۵۰۰۰,۳۰۰۰۰)$	$\sim U(۴۰۰۰,۳۵۰۰۰)$	$\sim U(۵۰۰۰,۳۵۰۰۰)$	$\sim U(۶۰۰۰,۴۰۰۰۰)$	$\sim U(۸۰۰۰,۴۰۰۰۰)$

\* U نمایانگر توزیع احتمالی یکنواخت می‌باشد.

جدول ۳. تولید داده‌های تصادفی برای مرحله دوم مدل مکانیابی-مسیریابی پیشنهادی

پارامتر	مسئله ۱	مسئله ۲	مسئله ۳	مسئله ۴	مسئله ۵	مسئله ۶	مسئله ۷
r	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳
m	۳	۴	۴	۵	۶	۶	۷
n	۲	۳	۳	۴	۴	۵	۵
o	۱	۱	۲	۲	۲	۳	۳
K	۲	۴	۵	۶	۷	۷	۸
K'	۲	۳	۴	۵	۵	۶	۶
qwk	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
QW <sub>k'</sub>	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵
qvk	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
QV <sub>k'</sub>	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵
U <sub>wr</sub>	$\sim U(0,2,0,1)$	$\sim U(0,2,0,1)$	$\sim U(0,2,0,1)$	$\sim U(0,2,0,1)$	$\sim U(0,2,0,1)$	$\sim U(0,2,0,1)$	$\sim U(0,2,0,1)$
U <sub>v<sub>r</sub></sub>	$\sim U(0,1,1)$	$\sim U(0,1,1)$	$\sim U(0,1,1)$	$\sim U(0,1,1)$	$\sim U(0,1,1)$	$\sim U(0,1,1)$	$\sim U(0,1,1)$
Du <sub>r</sub> : [a <sub>i</sub> ,b <sub>r</sub> ]	$\sim [U(2,10),$ $U(10,20)]$	$\sim [U(5,10),$ $U(15,20)]$	$\sim [U(8,12),$ $U(15,20)]$	$\sim [U(10,20),$ $U(25,40)]$	$\sim [U(15,25),$ $U(30,50)]$	$\sim [U(18,30),$ $U(35,70)]$	$\sim [U(25,50),$ $U(65,100)]$
Ck <sub>o</sub> Ck <sub>o</sub> '	$\sim U(50,100)$	$\sim U(100,150)$	$\sim U(150,250)$	$\sim U(250,450)$	$\sim U(480,480)$	$\sim U(300,500)$	$\sim U(300,550)$
Ser <sub>i,r</sub>	$\sim U(0,5,2)$	$\sim U(1,3)$	$\sim U(2,4)$	$\sim U(3,5)$	$\sim U(3,6)$	$\sim U(4,6)$	$\sim U(4,7)$
C <sub>ij</sub> و C <sub>i,r</sub> '	$\sim U(100,200)$	$\sim U(200,350)$	$\sim U(300,450)$	$\sim U(350,500)$	$\sim U(380,520)$	$\sim U(400,550)$	$\sim U(450,600)$
d <sub>ij</sub> و d <sub>i,r</sub> '	$\sim U(25,60)$	$\sim U(40,70)$	$\sim U(50,200)$	$\sim U(50,125)$	$\sim U(95,130)$	$\sim U(80,110)$	$\sim U(90,200)$
t <sub>ij</sub> و t <sub>i,r</sub> '	$\sim U(0,25,0,60)$	$\sim U(0,4,0,7)$	$\sim U(0,5,2)$	$\sim U(0,5,2)$	$\sim U(1,1,5)$	$\sim U(0,9,1,3)$	$\sim U(1,2,3)$
P <sub>ir</sub>	$\sim U(15,30)$	$\sim U(25,40)$	$\sim U(10,90)$	$\sim U(5,50)$	$\sim U(50,80)$	$\sim U(50,80)$	$\sim U(25,40)$
D <sub>i,r</sub>	$\sim U(10,50)$	$\sim U(10,90)$	$\sim U(10,90)$	$\sim U(10,90)$	$\sim U(15,38)$	$\sim U(15,40)$	$\sim U(10,90)$

\* U نمایانگر توزیع احتمالی یکنواخت می‌باشد.

شایان ذکر است که در جدول ۳ پارامتر مربوط به تعداد مراکز فرابارانداز، از آنجایی که در مرحله اول مدل پیشنهادی مکان یابی شده و مکان هر یک از آنها ثابت شده اند، پس از حل دقیق مرحله اول مدل پیشنهادی بدست آمده و به عنوان پارامتری برای مرحله دوم مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده اند.

در ادامه نتایج محاسباتی مسئله مکانیابی-مسیریابی چند کالایی ارائه شده است. حل دقیق مدل ریاضی برنامه ریزی عدد صحیح غیرخطی پیشنهادی در نرم افزار گمز نسخه ی ۲۳,۴,۳ با استفاده از چند حل کننده انجام شده است. مرحله اول مدل به وسیله ی ترکیبی از حل کننده-های بونمین و کنیت، و مرحله دوم مدل پیشنهادی توسط ترکیبی از حل کننده های سیپلکس، کوئین و کنیت حل شده است، الگوریتم های فراابتکاری نیز توسط نرم افزار MATLAB R2014b کد شده و بر روی کامپیوتر با پردازشگر 2.40 GHz و 4 G حافظه اجرا شده است.

بمنظور بررسی عملکرد الگوریتم ها و مدل ریاضی پیشنهادی از شاخص های زیر استفاده خواهد شد.

- مقدار انحراف از بهترین جواب پیدا شده : این شاخص برای الگوریتم A با استفاده از رابطه (۴۴) محاسبه خواهد شد.

$$GAP_A = \frac{\text{بهترین مقدار کشف شده توسط الگوریتم A - بهترین مقدار کشف شده مسئله}}{\text{بهترین مقدار کشف شده مسئله}} \times 100 \quad (44)$$

- میانگین تابع هدف و بازه حداقل اختلاف معنی دار :

$$RPD_A = \frac{\text{بهترین مقدار کشف شده توسط الگوریتم A - بهترین مقدار کشف شده توسط الگوریتم ها}}{\text{بهترین مقدار کشف شده توسط الگوریتم ها}} \times 100 \quad (45)$$

جداول ۴ و ۵ نتایج محاسباتی را برای الگوریتم های پیشنهادی و دو مرحله از مدل ریاضی مسئله در اندازه کوچک به همراه انحراف از بهترین جواب یافت شده، نمایش می دهد. همانطور که مشخص است در ستون های مربوط به توابع هدف در جدول ۴ و ۵ الگوریتم ازدحام ماهی های مصنوعی (AFS) همگرایی بسیار نزدیکتری به جواب دقیق مسئله نسبت به الگوریتم پیشنهادی موسوی و توکلی مقدم، الگوریتم ایمنی مصنوعی و الگوریتم پیشنهادی در مقاله حاضر دارد اما زمان رسیدن به جواب در این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم های ذکر شده بسیار بالاتر است (ستون های مربوط به زمان). در ستون زمان مربوط به الگوریتم

ایمنی مصنوعی (AIS)، چنانچه مشخص است زمان اجرای این الگوریتم بسیار کمتر از زمان اجرای سایر الگوریتم‌های فوق الذکر می باشد، که این دلیل روشنی برای ترکیب این دو الگوریتم و ارائه یک الگوریتم ترکیبی می باشد. در ستون مربوط به مقدار انحراف از بهترین جواب پیدا شده (GAP) الگوریتم‌های مربوطه با بهترین جواب بدست آمده مقایسه شده اند. چنانچه در این ستون‌های مشخص است در مسائل با اندازه کوچکتر در مرحله اول مدل مکان یابی مسیریابی پیشنهادی، الگوریتم پیشنهادی در مقاله موسوی و توکلی مقدم انحراف کمتری داشته اما در مسائل بزرگتر و همچنین در مرحله دوم مدل پیشنهادی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در این مقاله به وضوح نتایج بهتری را نشان داده است. در جداول ۷ و ۸ نیز معیار RPD نیز گواه اعتبار الگوریتم پیشنهادی در این مقاله می باشد.

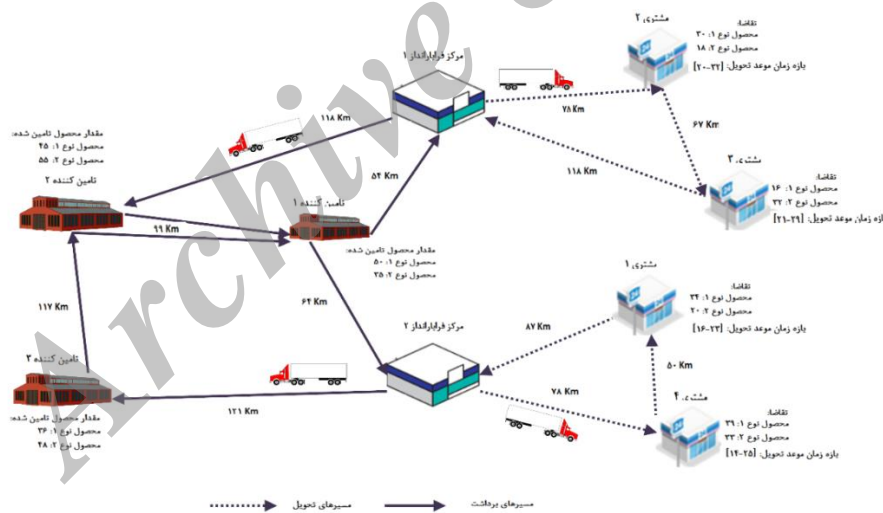
جدول ۴. نتایج مسائل نمونه‌ای کوچک برای مرحله اول مدل مکانیابی-مسیریابی

مسئله نمونه ای	جواب دقیق		SA-TS			AFS			AIS			AIS-AFS		
	تابع هدف	(ثانیه) زمان	تابع هدف	زمان (ثانیه)	GAP %	تابع هدف	زمان (ثانیه)	GAP %	تابع هدف	زمان (ثانیه)	GAP %	تابع هدف	زمان (ثانیه)	GAP %
مسئله ۱	۱۲۲۱۰	۱,۹۶۶	۱۲۲۸۹	۲,۵۲۱	۰,۶۴	۱۲۲۷۰	۷,۳۷۶	۰,۴۹	۱۲۲۱۰	۱,۷۵۱	۰	۱۲۲۱۰	۱,۸۶۴	۰
مسئله ۲	۳۰۶۹۹	۲۳۰	۳۱۳۲۳	۳,۱۲۶	۲,۰۳	۳۰۹۱۷	۸,۵۳۸	۰,۷۱	۳۱۳۶۵	۱,۸۷	۲,۱۶	۳۱۴۷۱	۱,۸۷۸	۲,۵۳
مسئله ۳	۴۲۷۷۷	۴۱۰	۴۳۹۵۰	۳,۶۴۱	۲,۷۴	۴۳۸۰۸	۱۴,۳۴۷	۲,۴۱	۴۵۷۹۷	۳,۱۱۳	۷,۰۵	۴۳۵۶۸	۳,۱۰۸	۱,۸۳
مسئله ۴	۹۲۷۷۹	۸۳۹,۵۰	۱۰۶۹۱۵	۳,۵۶۷	۱۵,۲۳	۱۰۶۸۷۲	۱۲,۰۹۴	۱۵,۱۸	۱۰۷۲۹۳	۲,۳۹۴	۱۵,۶۴	۱۰۰۲۲۲	۲,۷۰۱	۸,۰۲
مسئله ۵	۱۴۱۵۷۴	۱۱۶۲,۷۴	۱۶۴۲۵۱	۳,۳۱۴	۱۶,۰۱	۱۶۲۰۴۹	۱۱,۳۷۸	۱۴,۴۶	۱۶۸۷۰۵	۲,۳۵۷	۱۹,۱۶	۱۶۰۶۰۶	۲,۶۸۷	۱۳,۴۴
مسئله ۶	۱۸۳۳۰۵	۲۶۴۷,۰۸۵	۲۰۸۵۴۰	۳,۸۷۹	۱۳,۷۶	۲۰۰۱۷۰	۱۲,۷۰۸	۹,۲	۲۱۹۸۴۶	۲,۷۵۷	۱۹,۹۱	۱۹۴۷۰۹	۲,۹۶۹	۶,۲۲
مسئله ۷	۱۸۴۹۴۲	۲۶۷۷,۹۵	۲۰۳۸۶۱	۳,۳۳۵	۱۰,۲۳	۲۰۰۴۲۰	۱۵,۲۳۱۵	۸,۳۶	۲۰۸۲۸۰	۳,۲۴۵	۱۲,۶۲	۱۹۷۹۶۰	۳,۱۲۹	۷,۰۳

جدول ۵. نتایج مسائل نمونه‌ای کوچک برای مرحله دوم مدل مکانیابی-مسیریابی

مسئله	جواب دقیق		SA-TS			AFS			AIS			AIS-FS		
	تابع	زمان (ثانیه)	تابع هدف	زمان (ثانیه)	GA P%	تابع هدف	زمان (ثانیه)	GAP %	تابع هدف	زمان (ثانیه)	GAP %	تابع هدف	زمان (ثانیه)	GAP %
مسئله ۱	۳۴۰۱۵	۱۶,۵۹۹	۳۴۰۱۶	۸,۹۶۲	۰,۰۰۲	۳۴۰۱۶	۱۱,۰۶۴	۰,۰۰۲	۳۴۰۱۶	۲,۶۲۷	۰,۰۰۲	۳۴۰۱۶	۲,۷۹۶	۰,۰۰۲
مسئله ۲	۱۱۰۹۵۹	۱۰۰۱,۰۱	۱۱۳۰۵۱	۹,۴۴۸	۱,۸۸	۱۱۲۹۹۱	۱۲,۸۰۷	۱,۸۳	۱۱۲۹۹۱	۲,۸۰۵	۱,۸۳	۱۱۲۹۹۱	۲,۸۱۸	۱,۸۳
مسئله ۳	۲۰۳۲۹۵	۱۵۵۲,۲۳	۲۰۳۸۹۷	۸,۶۰۵	۰,۲۹	۲۰۳۸۶۵	۹,۵۶۴	۰,۲۸	۲۰۳۸۶۵	۲,۰۷۵	۰,۲۸	۲۰۳۸۶۵	۲,۰۷۲	۰,۲۸
مسئله ۴	۳۹۲۹۸۹	۱۸۳۰,۴۷	۴۰۰۲۸۳	۱۱,۹۲۲	۱,۸۵	۳۹۹۹۵۸	۱۸,۱۴۱	۱,۷۷	۳۹۹۹۵۸	۳,۵۹۱	۱,۷۷	۳۹۹۸۴۷	۴,۰۵۲	۰,۹۸
مسئله ۵	۶۱۶۰۶۰	۴۴۱۴,۷۹	۶۴۰۱۶۸	۱۱,۲۶۸	۳,۹۱	۶۳۹۲۶۳	۱۷,۰۶۷	۳,۷۶	۶۳۹۸۶۳	۳,۵۳۵	۳,۸۶	۶۳۸۵۳۷	۴,۰۳۱	۳,۶۴
مسئله ۶	۵۵۱۴۶۸	۱۰۰۹۳	۵۹۱۴۸۵	۱۲,۰۱۱	۷,۲۵	۵۷۳۰۴۰	۱۹,۰۶۲	۳,۹۱	۵۸۱۲۵۱	۴,۱۳۶	۵,۴۰	۵۶۹۴۶۸	۴,۴۵۴	۳,۲۶
مسئله ۷	۷۶۵۲۱۶	۱۱۰۹۰,۳	۸۱۸۲۵۱	۱۳,۴۵۲	۶,۹۳	۷۷۶۱۱۰	۲۲,۸۱۷	۱,۴۲	۷۸۴۸۵۰	۴,۸۶۷	۲,۵۶	۷۷۶۰۸۰	۴,۶۹۴	۱,۴۲

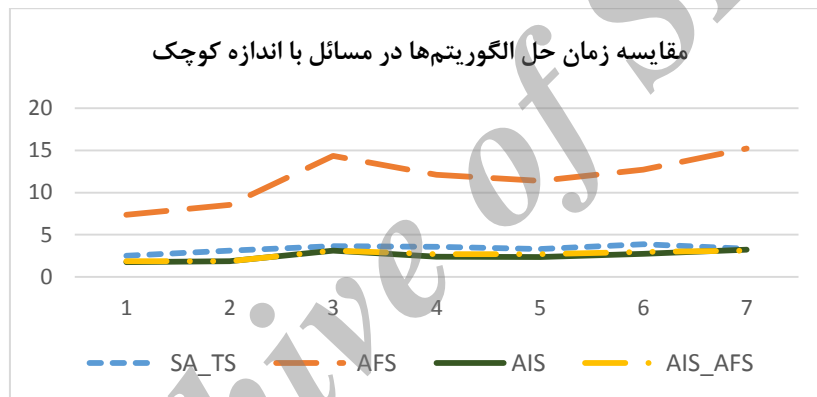
شکل ۶ نمایشی از جواب مسئله‌ای با وجود دو مرکز فرابارانداز را به تصویر می‌کشد که توسط الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی AIS\_AFS و برای مرحله دوم مدل ریاضی پیشنهادی حل شده است.



شکل ۶. تصویری از نمایش جواب مسئله‌ای با وجود دو مرکز فرابارانداز.

اشکال ۷ و ۸ زمان بکار برده شده برای حل مسائل با سایز کوچک را در الگوریتم‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است کمترین زمان مورد استفاده برای حل مسائل در مرحله اول و دوم مدل را الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی و پس از آن با اختلاف بسیار کمی الگوریتم پیشنهادی به خود اختصاص داده اند، الگوریتم ازدحام ماهی‌های مصنوعی نیز هم در مرحله اول و هم مرحله دوم مدل، بیشتری زمان حل را دارد. همچنین، نرخ همگرایی الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی پیشنهادی در شکل ۹ برای مسئله نمونه‌ای ششم با اندازه بزرگ در مرحله دوم مدل پیشنهادی نشان داده شده است.

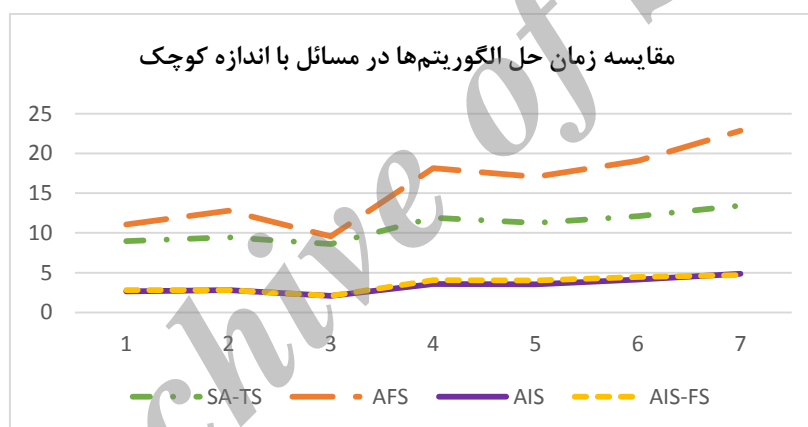
جداول ۷ و ۸ به ترتیب نتایج محاسباتی مراحل اول و دوم مدل را برای الگوریتم‌های پیشنهادی در مسائل با اندازه بزرگ نمایش می‌دهند.



شکل ۷. زمان بکار برده شده الگوریتم‌ها برای حل مرحله اول مدل و مسائل با اندازه کوچک (برحسب ثانیه)

جدول ۷. نتایج مسائل نمونه‌ای با اندازه بزرگ برای مرحله اول مدل مکانیابی-مسیریابی

مسئله نمونه ای	SA-TS			AFS			AIS			AIS-FS		
	تابع هدف	زمان (ثانیه)	RPD%	تابع هدف	زمان (ثانیه)	RPD%	تابع هدف	زمان (ثانیه)	RPD%	تابع هدف	زمان (ثانیه)	RPD%
مسئله ۱	۴۶۵۹۰۷۷	۲۳,۴۶۱	۰,۲۸	۴۶۵۱۵۰۰	۶۱,۲۷۷	۰,۱۲	۴۶۶۰۸۰۰	۱۳,۱۹۷	۰,۳۲	۴۶۴۵۹۰۰	۱۲,۷۴۲	۰
مسئله ۲	۹۸۴۳۴۸۹	۴۱,۳۱۲	۰,۷۳	۹۸۲۶۵۵۶	۱۱۰,۴۰۴۸	۰,۵۶	۹۸۴۷۳۳۹	۲۴,۷۹۱	۰,۷۷	۹۷۷۱۴۰۰	۲۲,۸۰۰	۰
مسئله ۳	۲۱۴۵۵۹۴۰	۷۶,۵۲۶	۱,۹	۲۱۰۹۰۰۰۰	۲۰۹,۲۷۱۱	۰,۱۶	۲۱۴۹۴۰۰۰	۴۸,۴۷۹	۲,۰۸	۲۱۰۵۵۰۰۰	۴۲,۹۷۰	۰
مسئله ۴	۳۱۷۶۲۵۹۲	۱۳۳,۶۴۵	۱,۱۴	۳۱۶۹۸۶۷۷	۳۳۱,۹۸۳	۰,۹۳	۳۲۲۰۲۰۰۰	۷۰,۷۸۴	۲,۵۴	۳۱۴۰۳۷۸۶	۷۹,۵۲۷	۰
مسئله ۵	۴۶۹۹۶۳۸۵	۱۵۲,۴۱۲	۰,۶۳	۴۶۷۷۰۰۰۰	۴۰۱,۲۴	۰,۱۴	۴۷۱۲۸۰۰۰	۹۸,۹۵۳	۰,۹۱	۴۶۷۰۱۰۰۰	۸۴,۳۹۳	۰
مسئله ۶	۶۶۵۱۰۵۵۲	۲۶۸,۱۴۵	۰,۴۳	۶۶۴۳۸۰۰۰	۵۷۹,۹۲	۰,۳۲	۶۷۱۸۱۸۲۲	۱۵۱,۴۸۵	۱,۴۵	۶۶۲۱۹۸۱۶	۱۲۳,۹۱۹	۰



شکل ۸. زمان بکار برده شده الگوریتم‌ها برای حل مرحله دوم مدل و مسائل با اندازه کوچک (برحسب ثانیه)



جدول ۸. نتایج مسائل نمونه‌ای با اندازه بزرگ برای مرحله دوم مدل مکانیابی-مسیریابی

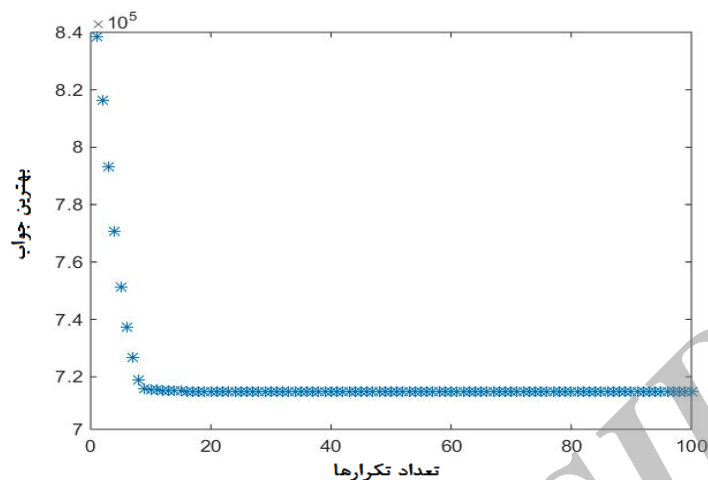
مسئله نمونه ای	SA-TS			AFS			AIS			AIS-FS		
	تابع هدف	زمان (ثانیه)	RPD%	تابع هدف	زمان(ثانیه)	RPD%	تابع هدف	(ثانیه) زمان	RPD%	تابع هدف	زمان (ثانیه)	RPD%
مسئله ۱	۵۴۲۱۳۰۰	۳۶,۵۲۱	۷,۹	۵۰۹۳۹۸۹	۹۱,۹۱۶	۱,۴	۵۳۶۷۵۰۰	۱۹,۷۹۶	۶,۸	۵۰۲۴۶۰۰	۱۹,۱۱۳	۰
مسئله ۲	۱۳۱۱۴۲۶۰	۷۰,۱۲۵	۲۹,۲	۱۰۱۴۷۳۲۰	۱۶۵,۶۰۷	۰	۱۱۴۴۶۵۲۴	۳۷,۱۸۶	۱۲,۸	۱۰۱۵۳۳۸۷	۳۴,۲۱	۰,۰۵
مسئله ۳	۳۱۴۲۱۵۸۷	۱۲۰,۶۴۶	۴۱,۳	۲۲۲۴۲۱۰۱	۳۱۳,۹۰۶	۰	۲۵۲۶۸۶۲۱	۷۲,۷۱۹	۱۳,۶	۲۲۳۲۸۵۱۴	۶۴,۴۵۵	۰,۳
مسئله ۴	۴۳۵۴۱۲۴۵	۱۹۸,۴۲۱	۴۲	۳۶۴۹۴۶۱۲	۴۹۷,۹۷۴	۱۹,۱	۴۰۱۵۷۲۱۵	۱۰۶,۱۷۶	۳۱,۱	۳۰۶۴۴۴۲۱	۱۱۹,۲۹۲	۰
مسئله ۵	۶۵۷۱۴۲۵۰	۲۳۱,۴۵۸	۳۵,۳	۵۴۸۴۵۹۸۵	۶۰۸,۶۰۰	۱۲,۹	۵۸۷۲۵۸۴۶	۱۴۸,۴۲۹	۲۰,۹	۴۸۵۶۶۴۶۶	۱۲۶,۵۹۰	۰
مسئله ۶	۹۰۵۲۴۱۸۷	۳۰۲,۱۲۴	۲۷,۳	۷۹۷۵۲۸۵۴	۸۶۹,۸۸۰	۱۲,۲	۸۸۵۰۳۵۲۱	۲۲۷,۲۲۸	۲۴,۵	۷۱۰۱۱۱۲۰	۱۸۵,۸۷۹	۰

همانگونه که در جدول ۷ مشخص است، در مرحله اول مدل مسئله برای هر ۶ مثال حل شده، کارایی الگوریتم ترکیبی سیستم ایمنی مصنوعی-ازدحام ماهی‌های مصنوعی بر اساس تابع هدف بهتر از سایر الگوریتم‌ها بوده است. اما با توجه به جدول ۸ در مرحله دوم مدل برای مسئله نمونه ای ۲ و ۳ میبینیم که الگوریتم ازدحام ماهی‌های مصنوعی با اختلاف بسیار کمی بهتر از الگوریتم پیشنهادی (AIS\_AFS) عمل کرده است.

برای رفع ابهام در بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی لازم است تا با استفاده از آزمون فرض آماری بررسی شود که آیا میانگین‌های این دو جامعه با یکدیگر اختلاف معناداری دارند یا خیر؟ و اگر اختلاف معناداری بین عناصر موجود در این دو جامعه وجود دارد کدام یک از آنها دارای میانگین کمتری می باشد.

به طور کلی هدف از آزمون‌های آماری تعیین حکمی درباره پارامتر یا پارامترهای مجهول جامعه است که می تواند درست یا نادرست باشد. هرگاه بخواهیم یک ادعا درباره پارامتر مجهول جامعه را از طریق تایید آن به وسیله اطلاعات حاصل از نمونه ثابت کنیم ادعای مورد نظر را به عنوان فرضیه یک و حالت نفی آن ادعا را به عنوان فرضیه صفر را در نظر می گیریم.

در این بخش برای انجام آزمون‌های فرض مربوطه و همچنین بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی از نرم افزار SPSS نسخه ۱۶,۰ استفاده شده است.



شکل ۹. نرخ همگرایی برای مسئله‌ی نمونه‌ای ششم با اندازه بزرگ در مرحله دوم مدل پیشنهادی

یکی از فرضیات اصلی برای اکثر آزمون‌های آماری، نرمال بودن توزیع مشاهدات است. اجرای آزمون نرمال بودن استفاده از آزمون کلموگروف-امیرنوف<sup>۱</sup> است. این آزمون یک آزمون ناپارامتری برای بررسی توزیع مشاهدات است. بنابراین ابتدا نرمال بودن متغیرهای این دو جامعه را بررسی کردیم و خروجی نرم افزار در سطح معناداری ۰,۰۵ نشان دهنده ی نرمال بودن هر دو جامعه بود.

حال برای بررسی وجود اختلاف معنادار بین میانگین‌های این دو گروه از آزمون فرض برابری میانگین‌های دو گروه وابسته (مشاهدات زوجی) استفاده می‌کنیم. هدف از انجام این آزمون که به آزمون قبل و بعد نیز معروف می‌باشد برابری میانگین‌های دو گروه وابسته می‌باشد. پیش فرض انجام آزمون، نرمال بودن متغیر مورد مطالعه در دو گروه می‌باشد، که بررسی شد. در این آزمون برای هر آزمودنی دو مشاهده وجود دارد. این آزمون در نرم افزار SPSS انجام شد و خروجی آن در سطح معناداری ۰,۱ فرض صفر را رد کرد و در نتیجه نشان داده شد که بین میانگین‌های دو جامعه اختلاف معناداری وجود دارد و از آنجا که

1- Kolmogorov-smirnov

میانگین الگوریتم AIS-AFS از میانگین AFS کمتر است، بنابراین الگوریتم پیشنهادی بهترین عملکرد را در بین سایر الگوریتم‌ها بررسی شده در این مقاله دارد. به منظور بررسی کارایی الگوریتم‌ها در حل مسائل با ابعاد بزرگ نمودار میانگین تابع هدف و بازه حداقل اختلاف معنی دار (با اطمینان ۹۵٪) در سه مرتبه اجراء برای الگوریتم‌ها، به ترتیب برای مرحله اول، مرحله دوم و هزینه‌های کل مدل پیشنهادی انجام شده است که نشان می‌دهد الگوریتم AIS-AFS در کل به نتایج بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها می‌رسد چرا که میانگین درصد انحرافات آن از همه کمتر می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

به طور سنتی انبارها در زنجیره تامین نقش موجودی بافر را در بین بخش‌های مختلف زنجیره ایفا می‌کردند، تا بدین وسیله تغییرات تقاضا در سطح زنجیره تا حد امکان تعدیل و هموار شوند. سیستم‌های فرابارانداز یکی از مهمترین گزینه‌ها برای کاهش زمان بین سفارش مشتری تا تحویل واقعی کالا می‌باشند، و در مواقعی که ویژگی‌های محصول و تقاضا اجازه بدهند، می‌توان از آنها برای کاهش موجودی در انبارهای زنجیره تامین استفاده کرد.

در این تحقیق، یک مسئله مکانیابی-مسیریابی جدید در شبکه‌های توزیع فرابارانداز بررسی شده است. یک شبکه ی لجستیک چند سطحه، تک دوره ای و چند محصولی، شامل تامین کنندگان، مراکز فرابارانداز و مشتریان ارائه شده است که در آن انواع محصولات می‌توانند از طریق چندین مرکز فرابارانداز برای تامین تقاضای مشتری انتقال پیدا کنند. ماهیت این مسئله NP-hard است، و به عنوان یک برنامه ریزی ریاضی فرموله شد. یک مدل برنامه ریزی مختلط عدد صحیح (MIP) دو مرحله ای برای مکان یابی مراکز فرابارانداز و مسیریابی وسایل نقلیه با وجود چند مرکز فرابارانداز برای شبکه‌های توزیع در زنجیره تامین ارائه شد. برای حل این مدل MIP دو مرحله پیشنهادی، در این تحقیق یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر الگوریتم سیستم‌های ایمنی مصنوعی بدن، و الگوریتم ازدحام ماهی‌های مصنوعی ارائه شد که نه همگرایی نزدیکی به جواب بهینه داشت بلکه زمان محاسباتی برای بدست آوردن

جواب نزدیک به بهینه به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافت. برای اعتبار و صحت الگوریتم پیشنهادی، سیزده مسئله نمونه ای که به طور تصادفی تولید شده اند، با اندازه‌های مختلف توسط الگوریتم‌های دقیق و فرا ابتکاری حل شدند. روش حل ارائه شده در یافتن جواب بهینه برای اوانع مسائل نمونه ای از نظر زمان اجرا و کیفیت راه حل کارآمد بوده است. الگوریتم پیشنهادی می تواند در شرایطی که حل کننده‌های تجاری برای مسائل مکان یابی مسیریابی با اندازه بزرگ در دسترس نیستند در برنامه‌های کاربردی واقعی برای مدیریت زنجیره تامین به خوبی استفاده شود.

### پیشنهاد برای تحقیقات آتی

- تعمیم مدل ریاضی پیشنهادی برای مدل سازی مسئله در شرایط یکپارچگی مدل مربوطه به جای دو مرحله ای بودن آن.
- تعمیم مدل ریاضی پیشنهادی برای مدل سازی مسئله در شرایط وجود سیستم‌های فرابارانداز با وجود چندین درب خروجی و ورودی<sup>۱</sup>
- تعمیم مدل ریاضی پیشنهادی برای مدل سازی مسئله با در نظر گرفتن پارامترهای نامشخص (به عنوان مثال، فازی و یا تصادفی) با توجه به ماهیت پیچیده ای که سیستم‌های فرابارانداز دارند و به منظور تبدیل مدل پیشنهادی به یک مدل ریاضی واقعی تر و عملی تر.
- تعمیم مدل ریاضی پیشنهادی با در نظر گرفتن حالت چند دوره‌ای<sup>۲</sup>
- توسعه روش‌های فراابتکاری برای حل مسئله

1- Multiple-dock door

2- Multi-period

## منابع

علی محتشمی، علی فلاحیان نجف آبادی، زمانبندی حمل و نقل کامیون‌ها در زنجیره تأمین با در نظر گرفتن بارانداز تقاطعی و با استفاده از الگوریتمهای فراابتکاری، فصلنامه علمی - پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی - سال یازدهم، شماره ۳۱، زمستان ۹۲، صفحات ۵۵ تا ۸۴

Boventer, E. (1961). The relationship between transportation costs and location rent in transportation problems. *Journal of Regional Science*, 3(2), 27-40.

De Castro, L. N., & Timmis, J. (2002). Artificial immune systems: a new computational intelligence approach. *Springer Science & Business Media*.

Donaldson, H., Johnson, E. L., Ratliff, H. D., & Zhang, M. (1998). Schedule-driven cross-docking networks. Georgia tech tli report, *The Logistics Institute, Georgia Tech*.

Farmer, J. D., Packard, N. H., & Perelson, A. S. (1986). The immune system, adaptation, and machine learning. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 22(1), 187-204.

Gümüş, M., & Bookbinder, J. H. (2004). Cross-docking and its implications in location-distribution systems. *Journal of Business Logistics*, 25(2), 199-228.

Jayaraman, V., & Ross, A. (2003). A simulated annealing methodology to distribution network design and management. *European Journal of Operational Research*, 144(3), 629-645.

Li, X. L., Shao, Z. J., & Qian, J. X. (2002). An optimizing method based on autonomous animats: fish-swarm algorithm. *System Engineering Theory and Practice*, 22(11), 32-3

Maranzana, F. E. (1964). On the location of supply points to minimize transport costs. *OR*, 261-270.

Mousavi, S. M., & Tavakkoli Moghaddam, R. (2013). A hybrid simulated annealing algorithm for location and routing scheduling

problems with cross-docking in the supply chain. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(2), 335-347.

Mousavi, S. M., Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Hashemi, H. (2014). Location of cross-docking centers and vehicle routing scheduling under uncertainty: A fuzzy possibilistic-stochastic programming model. *Applied Mathematical Modelling*, 38(7), 2249-2264.

Musa, R., Arnaout, J. P., & Jung, H. (2010). Ant colony optimization algorithm to solve for the transportation problem of cross-docking network. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), 85-92.

Prodhon, C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 1-17.

Ross, A., & Jayaraman, V. (2008). An evaluation of new heuristics for the location of cross-docks distribution centers in supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 55(1), 64-79.

Sung, C. S., & Song, S. H. (2003). Integrated service network design for a cross-docking supply chain network. *Journal of the Operational Research Society*, 54(12), 1283-1295.

Sung, C. S., & Yang, W. (2008). An exact algorithm for a cross-docking supply chain network design problem. *Journal of the Operational Research Society*, 59(1), 119-136.

Van Belle, J., Valckenaers, P., & Cattrysse, D. (2012). Cross-docking: State of the art. *Omega*, 40(6), 827-846.

Watson-Gandy, C. D. T., & Dohrn, P. J. (1973). Depot location with van salesmen—a practical approach. *Omega*, 1(3), 321-329.

Webb, M. H. J. (1968). Cost functions in the location of depots for multiple-delivery journeys. *OR*, 311-320.