

# مدل‌سازی ریاضی برای مسئله مکان‌یابی-مسیریابی دو سطحی در زنجیره تأمین مواد غذایی فسادپذیر با ریسک اختلال

ندامشهدی: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران  
رضا توکلی مقدم\*: استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، Email: tavakoli@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۸/۹/۲۹

چکیده

مدیریت زنجیره تأمین غذایی به دلیل مقیاس بالای آن در صنعت، مقدار اتلاف مواد غذایی در جهان و رابطه بین اتلاف مواد غذایی و سوء تغذیه جهانی از اهمیت بالایی برخوردار است. زنجیره تأمین مواد غذایی شامل تهیه و تولید غذا و شرکت‌های تولیدکننده، عمده فروشی و کارخانه‌های توزیع، دلالان، مکان‌های سرویس غذا و رستوران‌هاست. بررسی اقلام فسادپذیر در قالب زنجیره تأمین می‌تواند نیازهای بخشی از صنایع که با این اقلام در ارتباط هستند را برطرف کند. این مقاله مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین مواد غذایی فاسدشدنی با ریسک اختلال را مطالعه می‌کند که شامل مکان‌یابی تسهیلات، تخصیص جریان بین تسهیلات و تصمیمات مسیریابی است و به ارائه مدل سه هدفه جهت کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی شامل هزینه بازگشایی مراکز خدمات‌رسانی، هزینه تعمیر مسیرها در جریان اختلال و هزینه تقاضاهای برآورده نشده، کمینه‌سازی زمان پاسخ و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان مسیرها می‌پردازد. درستی مدل پیشنهادی از طریق حل با روش محدودیت اسیلون در نرم‌افزار گمز بررسی می‌شود. از آنجا که این مسئله جزو آن دسته مسائل NP-hard به شمار می‌آید، برای حل آن در ابعاد بزرگ از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب استفاده می‌شود. در خاتمه، جهت نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی ارائه شده، نمونه مطالعات واقعی شامل نواحی ده‌گانه منطقه یک شهر تهران مورد آزمون قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: زنجیره تأمین مواد غذایی، فسادپذیر، ریسک اختلال، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب.

## Mathematical modeling of a two-echelon location-routing problem in a perishable food supply chain with disruption risk

Neda Mashhadi<sup>1</sup>, Reza Tavakkoli-Moghaddam<sup>2\*</sup>

Abstract

Food supply chain management is very vital due to its high scale in industry, amount of wastage of food in the world and relationship between wastage of food and under-nourishment. It consists of producing the food and manufacturing companies, whole sale and distributors, brokers, food service places, restaurants and retail grocery firms. Studying perishable goods in a supply chain can be helpful for industries that are related to these kinds of goods. Because of the important role of location and routing in a supply chain, unity of these elements leading to an efficient supply chain. Recently, multi-layer and multi-facility problems in a supply chain have been studied in large scale. Connection between facilities (i.e., the best flow allocating between facilities and vehicle routing for supplying the perishable foods) is one of the key subjects for this problem. This paper studies a perishable food supply chain network with disruption risk including the location of facilities, allocating flow between facilities and routing decisions. It also presents a multi-objective model to minimize the operational costs (e.g., opening cost, route repairing cost during the disruption and unsatisfied demands cost), minimize the response time, and maximize the reliability of minimum routes. Validity of the model is investigated by the  $\epsilon$ -constraint method in Gams. Since this problem is an NP-hard one, the NSGA-II is used for solving this problem in large sizes. Finally, to show the efficiency of the proposed model, a real case study including 10-zone of district 1 of Tehran is applied.

**Keywords:** food supply chain, perishable, disruption risk, NSGA-II algorithm.

1 - M.Sc., School of Industrial Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2 - Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, tavakoli@ut.ac.ir



## مقدمه

زنجیره تامین به عنوان یکی از کلیدی ترین مباحث در دستگاه های تولید و توزیع شناخته می شود. به دلیل افزایش رقابت در جهان، شرکت ها برای فراهم آوری کالاها با قیمت و کیفیت مناسب و در زمان تحویل کمتر برای مشتریان خود به استفاده از شبکه های زنجیره تامین و لجستیک روی آورده اند. هدف فعالیت های زنجیره تامین شناسایی تقاضای مشتریان، بهبود قابلیت پاسخ دهی به مشتریان، کنترل تولید یا فرآیندهای خدمت رسانی و همسویی اهداف شرکای زنجیره تامین است. مدیریت زنجیره تامین غذایی<sup>۱</sup> به دلیل مقیاس بالایش در صنعت، مقدار اتلاف مواد غذایی در جهان و رابطه بین اتلاف مواد غذایی و سوء تغذیه جهانی از اهمیت بالایی برخوردار است. زنجیره تامین مواد غذایی شامل تهیه و تولید غذا و شرکت های تولیدکننده، عمده فروشی و کارخانه های توزیع، دلالان، مکان های سرویس غذا و رستوران هاست. همچنین از آنجایی که اقلام فسادپذیر<sup>۲</sup> به عنوان کالایی پر کاربرد در صنعت شناخته می شود، جایگاه ویژه ای در پژوهش های انجام شده دارند. از این رو بررسی اقلام فسادپذیر در قالب زنجیره تامین می تواند نیازهای بخشی از صنایع که با این اقلام در ارتباط هستند را برطرف کند. زنجیره تامین محصولات فاسدشدنی دارای ویژگی های خاصی از قبیل عمر کوتاه، شرایط نگهداری خاص، تجهیزات و تسهیلات ویژه جهت نگهداری، تولید، توزیع است. بر اساس مدیریت زنجیره تامین مواد غذایی، این نوع مواد باید قبل از فاسدشدن به فروش رفته و همین طور حداکثر سود حاصل شود. برخلاف اهمیت زیاد غذا در صنعت در زمینه زنجیره تامین غذایی تحقیقات گسترده ای صورت نگرفته و دلیل آن پیچیدگی شبکه مدیریت تامین غذایی و وجود محصولات خاص و شاخصه های پردازش گوناگون است. همچنین کلیه زنجیره های تامین با چالش های ریسک اختلال و بحران روبرو هستند. در واقع اثر بلندمدت اختلال روی زنجیره تامین اثر گذاشته و موجب بحران در آن می شود.

## پیشینه پژوهش

با در نظر گرفتن طیف وسیع تصمیم گیری زنجیره تامین غذایی هیچ مدلی قادر به در نظر گرفتن تمام بعدهای مسئله نیست. تحقیقات مربوط به محصولات غذایی، اکثراً فسادپذیری محصولات را در نظر گرفته اند. مدیریت زنجیره تامین اقلام فسادپذیر طیف وسیعی از زنجیره عرضه ماهیان پرورشی گرم آبی [۱] تا خدمات درمانی [۲] و زنجیره تامین بشردوستانه [۳] می شود.

نهمیاس [۴]، گوپال و گری [۵]، مطالعات وسیعی را در زمینه سیستم های موجودی و محصولات با در نظر گرفتن فسادپذیری انجام دادند. این مقالات بین دو نوع از فسادپذیری تفاوت قائل شدند: ماندگاری ثابت و ماندگاری تصادفی. هوانگ [۶]، مسیریابی وسیله نقلیه برای تعیین الگوی بهینه عرضه محصولات غذایی و تخصیص موجودی برای مناطق قحطی زده ارائه داد. زمان بندی محصولات و مسیریابی وسایل حمل و نقل با پنجره زمانی برای

محصولات غذایی فسادپذیر، کار مشترک چن و همکاران [۷] بود که در آن یک مدل ریاضی غیرخطی مطرح و با استفاده یک روش ابتکاری آن را حل کردند. رانگ و همکاران [۸] به وسیله یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مدیریت زنجیره تامین محصولات غذایی تازه از قبیل سبزیجات با تأکید بر سیستم های توزیع بر پایه کیفیت پرداختند. گویندیان و همکاران [۹] یک مسئله دو سطحی مکان یابی- مسیریابی با پنجره زمانی را برای یک زنجیره تامین پایدار مواد غذایی ارائه کردند. خلیلی و همکاران [۱۰] یک مدل دوهدفه برای محصولات فسادپذیر ارائه کردند و با الگوریتم فرایتکاری به حل آن پرداختند. توکلی مقدم و اطروودی [۱۱] هم کار چن و همکاران [۷] را گسترش داده و با در نظر گرفتن گره های وزن دار در شبکه زنجیره تامین مواد غذایی فاسدشدنی به ارائه یک مدل پرداختند. کلانتری و پیشوایی [۱۲]، یک مدل برنامه ریزی امکانی استوار برای زنجیره تامین دارو ارائه کردند و با یک مطالعه موردی کیفیت بالای عملکرد برنامه ریزی امکانی استوار را نشان دادند.

کاظمی و همکاران [۱۳]، اولین بار مدل مسئله موجودی- مسیریابی واحدهای خونی را ارائه و با روش شاخه و برش ابداعی حل کردند. چو و همکاران [۱۴] یک مدل مسیریابی- موجودی و تولید برای اقلام فسادپذیر پیشنهاد داده اند. هدف مدل ارائه شده آن ها پاسخ به این پرسش اساسی است که چه زمان و به چه مقدار محصولات را با توجه به تغییرپذیری زمان های تولید سفارش داده و همچنین بفروشند. به این منظور مسئله مسیریابی تولید برای محصولات فسادپذیر توسعه داده شده و با روش دقیق شاخه و برش حل و بررسی شده است. نتایج این مدل حاکی از کاهش ۱۲٪ در هزینه هاست. طراحی شبکه زنجیره تامین موضوع مهمی در برنامه ریزی برای محصولات فسادپذیر است که کایزر و همکاران [۱۵] به آن پرداخته اند. در واقع طراحی متفاوت شبکه زنجیره تامین سبب تفاوت در زمان و شرایطی در حمل و نقل، انبارداری و فرآیند تهیه و تولید خواهد شد؛ بنابراین اهمیت سفارش به موقع محصولات ضمن حفظ کیفیت آن ها به ویژه برای مواد غذایی اهمیت پیدا می کند. به همین منظور یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط با هدف بیشینه سازی سود ارائه شده است.

جانسن و همکاران [۱۶] یک سیاست سفارش دهی موجودی بر اساس زمان های متفاوت در روز (صبح، ظهر، بعدازظهر و شب) با در نظر گرفتن عمر مفید و زمان سفارش محصولات به صورت قطعی، تقاضای احتمالی و سیاست سفارش دهی همزمان FIFO و LIFO، برای ارائه یک مدل موجودی برای اقلام فسادپذیر پیشنهاد داده اند. نتایج این مدل نشان می دهد هزینه های سیستم موجودی تا ۶۶٪ نسبت به زمانی که مدل کنترل موجودی بر اساس کل ساعات یک روز برنامه ریزی می شود، کاهش می یابد. جانسن و همکاران [۱۷] در ادامه توسعه مدل قبل محدودیت زمان های تعطیل (که باعث افزایش عمر محصولات فسادپذیر می شود) و تقاضای پویای احتمالی را به مسئله اضافه کرده اند و نشان داده اند با اضافه کردن این محدودیت تصمیمات مربوط به سفارش دهی بهبود می یابد و همچنین اتلاف محصولات کاهش

یافته که سبب کاهش هزینه‌های نهایی سیستم موجودی خواهد شد.

دسترسی به اطلاعات تقاضا برای محصولات فسادپذیر به‌ویژه مواد غذایی امری دشوار است که چالش‌های فراوانی برای مدل‌های موجودی این دسته از اقلام ایجاد کرده است. یکی از راه‌هایی که برای جمع‌آوری به موقع و درست اطلاعات تقاضا در مدل ژانگ و همکاران [۱۸] پیشنهاد شده، سیستم اینترنت اشیا است. آن‌ها از این روش برای جمع‌آوری اطلاعات تقاضا به‌عنوان پارامتر ورودی مدل دوسطحی زنجیره تأمین بیان شده استفاده می‌کنند. در اکثر مدل‌های بررسی شده در ادبیات موجودی محصولات فسادپذیر به سبب راحتی مدل‌سازی از نرخ ثابت فساد برای محصولات استفاده شده است. آلیو و همکاران [۱۹] مدلی برای سفارش‌دهی اقلام فسادپذیر با در نظر گرفتن نرخ فساد وابسته به زمان و تقاضای نمایی برای ارائه کرده‌اند.

مسائل مکان‌یابی-مسیریابی<sup>۳</sup> از مسائل مهم در لجستیک است که شامل مکان‌یابی<sup>۴</sup> و مسیریابی خودروه<sup>۵</sup> است. مطالعات اخیر در زمینه مکان‌یابی-مسیریابی دوسطحی تمرکز کردند که بهینه‌سازی آن از جمله مسائل بسیار سختی است. اولین کاربروری مکان‌یابی-مسیریابی دوسطحی توسط لین و همکاران [۲۰] منتشر شده است. کراینیک و همکاران [۲۱ و ۲۲] مکان‌یابی-مسیریابی دوسطحی را مطالعه کرده‌اند و تأثیر محل‌های مراکز توزیع را با رویکرد دقیق تجزیه و تحلیل کردند. شانکار و همکاران [۲۳] تصمیم‌گیری برای مکان‌یابی و تخصیص برای یک شبکه زنجیره تأمین چندسطحی چندهدفه را بررسی کردند. در مدل‌سازی آنها دو تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌های احداث تسهیلات و حمل‌ونقل و بیشینه‌سازی تقاضای برآورده‌شده مشتری با روش فراابتکاری حل شده است. در مقاله‌ای از احمدی جاوید و آزاد [۲۴] به تصمیم‌گیری همزمان در موجودی کالا و مکان‌یابی-مسیریابی پرداخته شده است. آن‌ها در یک مدل تازه به بهینه‌سازی همزمان مکان‌یابی، تخصیص، ظرفیت و موجودی و همین‌طور مسیریابی در یک زنجیره تأمین تصادفی پرداختند که در آن میزان تقاضای مشتری غیرقطعی و از یک توزیع نرمال پیروی می‌کرد. نیکو قدیرلی و همکاران [۲۵] مدل دوهدفه مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی برای حداقل کردن هزینه کل و متوسط زمان خدمت‌رسانی به مشتری تحت شرایط چند کالایی و چند زمانه پرداختند.

یکی از اولین مدل‌های ریاضی برای مکان‌یابی تسهیلات با استفاده از عرضه‌کننده‌های غیرقابل اعتماد توسط درزور [۲۶] ارائه شد. اشنایدر و همکاران [۲۷] طیف گسترده‌ای از مدل‌های برنامه‌ریزی را برای مسائل طراحی استراتژیکی شبکه زنجیره تأمین و مکان‌یابی تسهیلات تحت امکان تهدید اختلال ارائه کردند. احمدی جاوید و همکاران [۲۸] مسئله مکان‌یابی-مسیریابی در شبکه زنجیره تأمین تک‌محصوله را با ریسک اختلال تولیدکننده و توزیع‌کننده برای مکان‌یابی و تخصیص مجموعه‌ای از تولیدکننده-توزیع‌کننده بالقوه و ساخت مسیرهای وسیله نقلیه برای ملاقات زنجیره تأمین مشتری در نظر گرفته‌اند و مسئله با مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تحت ۳ سیاست اندازه‌گیری

ریسک فرمول‌بندی شد. ژانگ و همکاران [۲۹] مسئله مسیریابی-مکان‌یابی قابل اعتماد با ظرفیت محدود تحت شرایط اختلال تصادفی در انبارها را بررسی کردند و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط سناریومحور را جهت بهینه‌سازی مکان انبارها، مسیرهای تحویل خارج از محدوده و برنامه‌های پشتیبانی ارائه کردند. هاتفی و همکاران [۳۰] یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی فازی برای طراحی شبکه‌های لجستیک مستقیم-معکوس پایدار در شرایط وجود ریسک‌های اختلال احتمالی و تصادفی تسهیلات ارائه کردند و به معرفی استراتژی‌های قابل اعتماد مؤثر از قبیل معرفی تسهیلات قابل اعتماد و غیرقابل اعتماد، ظرفیت اختلال کامل و جزئی می‌پردازند. شیشه‌بری [۳۱] شبکه لجستیکی قابل اعتماد چندکالایی و چندخودرویی، چندجاده‌ای (۳ نوع جاده ارتباطی) با در نظر گرفتن اختلال در تسهیلات و جاده‌های ارتباطی وسیله نقلیه ارائه داد. کلانتر نیستانی و مظفری [۳۲] یک مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین سه‌سطحی شامل تأمین‌کننده‌ها، مراکز خدمات پزشکی و نقاط تقاضا را ارائه کردند. در سناریوهای مختلف مراکز خدمات پزشکی دچار اختلال می‌شوند. آن‌ها مدل را بر یک مطالعه موردی پیاده‌سازی و کارایی آن را در مثال‌های کاربردی نشان می‌دهند. آزاد و همکاران [۳۳] مدلی را برای مقابله با اختلال در شبکه زنجیره تأمین ارائه کردند و با روش بندرز به حل آن پرداختند. ژاله‌چیان و همکاران [۳۴] یک مدل مسیریابی، مکان‌یابی و موجودی برای زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت ارائه کردند. مسئله در اندازه بزرگ با استفاده از الگوریتم ترکیبی ابتکاری حل شده است. در نهایت یک مطالعه موردی جهت نشان دادن عملکرد صحیح مدل ارائه شده است. توکلی مقدم و همکاران [۳۵] یک مسئله مسیریابی، مکان‌یابی و موجودی را در حالت چنددوره‌ای و چند محصولی به همراه ناوگان حمل‌ونقل ناهمگن در نظر گرفت. عدم قطعیت در تقاضای مشتریان در این پژوهش به صورت فازی در نظر گرفته شده است. همچنین استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری به‌ویژه ژنتیک جهت توسعه و مشاهده عملکرد مدل‌های پیشنهادی برای مکان‌یابی تسهیلات در شرایط اختلال نیز در مقالات ارکات و همکاران [۳۶] و جمالی و همکاران [۳۷] مشاهده می‌شود.

### شکاف تحقیق و نوآوری

همان‌طور که مشخص است تحقیقات به‌عمل‌آمده عموماً تنها به ارسال کالاها از مبدأ به مقصد پرداخته‌اند. این در مقاله به مسئله مکان‌یابی کارخانه‌ها و مراکز توزیع و مسیریابی وسایل نقلیه و همچنین امکان تخریب مسیرهای ارتباطی و اختلال در مراکز توزیع پرداخته که هر یک از مراکز توزیع با احتمال مشخصی در سناریوهای مختلف دچار اختلال شده و هر یک از کمان‌های شبکه که مسیرهای ارتباطی را شکل می‌دهند، با احتمال مشخصی در زمان مسدود می‌شوند. مقالات بسیار کمی در حیطه ارسال مواد فسادپذیر پرداخته‌اند که ریسک اختلال را نیز در مراکز توزیع و همین‌طور امکان خرابی مسیرها و تعمیر مسیرها را در نظر گرفته باشند. این تحقیق مسئله مکان‌یابی-مسیریابی دوسطحی انتقال



کالاها از کارخانه به مشتریان به واسطه انبارهای میانی (مراکز توزیع) است. شبکه زنجیره تامین طراحی شده باید قابلیت پاسخ دهی به نیازهای مشتریان را هنگام وقوع ریسک اختلال، مانند اختلال در تسهیلات یا اختلال در مسیر را دارا باشد. بنابراین این شبکه ها باید به گونه ای طراحی شوند که به هنگام وقوع اختلال توانایی فراهم آوری محصولات و خدمات به مشتریان را در هر لحظه از زمان داشته باشند. این احتمال با توجه به عواملی مانند شرایط جغرافیایی و یا نوع زیرسازی ها و مصالح به کاررفته در ساخت کمان مشخص می شود. مدل ریاضی ارائه شده ضمن تعیین مکان استقرار تسهیلات، تعیین شیوه تخصیص مشتریان به آن ها، مسیرهای بهینه خدمت رسانی را به گونه ای تعیین می کند که نرخ تعداد مشتریان پوشش داده نشده و میانگین زمان های سفر در واحد زمان کمینه شود. هدف این تحقیق مکان یابی تسهیلات و تعیین اندازه هر محموله و مؤثرترین مسیرهای خودرو برای به حداقل رساندن هزینه کل در ۳ سطح کارخانه ها، مراکز توزیع و مشتریان تحت وجود ریسک اختلال در سیستم است.

### شرح مسئله

دنیای رقابتی امروز شرکت ها را بر آن می دارد تا تصمیمات استراتژیکی و عملی جهت بهینه سازی و مدیریت سودمند پردازش دستگاه های لجستیک خود اتخاذ کنند. مسئله مکان یابی- مسیریابی وسیله نقلیه از مسائل مهم در لجستیک است و با توجه به نوع تسهیلات و محصولات از اهمیت ویژه ای برخوردار است. این موضوع در مورد محصولات شدیداً فاسدشدنی اهمیت دوچندانی پیدا می کند. مسئله مکان یابی- مسیریابی متشکل از دو مسئله مکان یابی انبار و مسیریابی وسایل نقلیه است که در مدل ریاضی مکان یابی- مسیریابی این دو مسئله را همزمان در نظر گرفته و مسئله را حل می کنند. با استفاده از سیستم های حمل و نقل مشتری محور می توان بازارهای فعال کنونی را گسترش داد و نیز بازارهای تازه ایجاد کرد، محصولات فاسدشدنی را در حداقل زمان به مصرف کنندگان برساند و با حداقل رساندن زمان تحویل کالا رضایت مشتریان افزایش یابد که همین امر سبب به تسخیر درآوردن بازار کالا مربوطه می شود.

زنجیره های تامین به ویژه زنجیره های تامین جهانی در معرض طیف وسیعی از ریسک ها قرار دارند که این ریسک ها عملکرد تامین کننده ها و کل زنجیره تامین را در معرض خطر قرار می دهند. به طور مثال بلایای طبیعی، اعتصابات و اقدامات تروریستی از جمله این ریسک ها است. در نتیجه شرکت ها می بایست استراتژی های مدیریتی خود را برای پاسخ دهی سریع به حوادث غیرمنتظره در زنجیره تامین حذف و یا کاهش اثرات نامطلوب حوادث غیرمنتظره بهبود دهند. در بیشتر مدل های مکان یابی یا مدل های طراحی شبکه زنجیره تامین فرض بر این است که تسهیلات تولیدی یا توزیعی همواره سالم و در دسترس هستند؛ اما هنگامی که تسهیلات دچار اختلال می شوند، ساختار مدلی به کلی تغییر می کند و مدل های کنونی در این شرایط کارا نیستند. بنابراین این مدل ها باید به گونه ای طراحی شوند که در شرایط وجود ریسک های

اختلال نیز کارا باشند. ریسک اختلال هنگامی اتفاق می افتد که ساختار سیستم زنجیره تامین دچار تغییر اساسی شود و دلیل آن در دسترس نبودن تسهیلات توزیع، انبار، تولید و یا اختلال موجود در حمل و نقل ناشی از وقایع غیرمنتظره طبیعی یا بشری است. اختلال یک تامین کننده یا یک زیرسامانه باعث کمبود عرضه و یا در بدترین حالت باعث اختلال کل زنجیره می شود. در چنین محیط عرضه کننده ممکن است پیامدهای نامطلوبی بر موفقیت همه شرکت های موجود در زنجیره تامین داشته باشد. هزینه های از دست رفته کاهش سهم بازار و جریمه های قراردادهای بسته شده همگی از پیامدهای ممکن اختلال ها در زنجیره تامین است.

در این تحقیق مسئله مکان یابی- مسیریابی دوسطحی انتقال کالاها از کارخانه به مشتریان به واسطه انبارهای میانی (مراکز توزیع) صورت می گیرد. در سطح اول به اتخاذ تصمیمات مربوط به انتخاب تسهیلات فعال از مجموعه کارخانه ها و مراکز توزیع بالقوه و در سطح دوم تصمیمات مربوط به تعیین مقدار محصولات تحویل داده شده به مشتریان از مراکز توزیع و متعاقباً به مراکز توزیع از کارخانه ها و همچنین مسیریابی وسیله نقلیه می پردازیم. شبکه زنجیره تامین طراحی شده باید قابلیت پاسخ دهی به نیازهای مشتریان را هنگام وقوع ریسک اختلال مانند اختلال در تسهیلات را دارا باشد. بنابراین این شبکه ها باید به گونه ای طراحی شوند که به هنگام وقوع اختلال توانایی فراهم آوری محصولات و خدمات به مشتریان را در هر لحظه از زمان داشته باشند. هدف این تحقیق مکان یابی تسهیلات و تعیین اندازه هر محموله و مؤثرترین مسیرهای خودرو برای حداقل کردن هزینه کل در ۳ سطح (کارخانه ها، مراکز توزیع و مشتریان) تحت وجود ریسک اختلال در سیستم است.

### مدل سازی ریاضی

#### مفروضات مدل ریاضی:

- مکان های نامزد شده برای مراکز توزیع بالقوه از پیش تعیین شده و به طور معقولی نزدیک به نقاط تقاضا هستند.
- کالاهای توزیعی به نقاط تقاضا تنها مواد غذایی فاسدشدنی هستند.
- هر نقطه تقاضا دارای تقاضای متفاوت برای کالا در هر دوره زمانی است.
- مسیرهای متفاوت بین مراکز توزیع بالقوه و نقاط تقاضا در نظر گرفته شده است.
- در شرایط واقعی وسایل نقلیه متفاوتی به هر نقطه تقاضا خدمت رسانی می کنند. بنابراین فرض شده که هر وسیله نقلیه تنها به یک نقطه تقاضا در هر دوره زمانی خدمت رسانی می کند و هر نقطه تقاضا می تواند توسط وسایل نقلیه متفاوتی خدمت دریافت کند.
- مراکز توزیع در سناریوهای مختلف دچار اختلال می شوند.
- هر مسیر ممکن است بعد از وقوع اختلال به صورت جزئی آسیب ببیند و میزانی قابلیت اطمینان بر اساس درصد خرابی اش دارد. قابلیت اطمینان به عنوان شاخصی برای

- حداکثرسازی امنیت رانندگان و میزان بار رسانده شده به نقاط تقاضا در نظر گرفته می شود.
- تعدادی گروه تعمیرات مجهز به بولدوزر، حفارگر، کامیون و دیگر تجهیزات به منظور بازیابی هر چه سریع تر مسیرهای مهم وجود دارد.
- طول هر دوره زمانی ممکن است از چند ساعت تا یک روز تحت سناریوهای مختلف متفاوت باشد.
- مسیرهای تحت عملیات بازیابی قابل استفاده برای فرآیند توزیع نیستند.
- یک مسیر بعد از عملیات بازیابی کاملاً امن و قابل اطمینان خواهد بود.
- هر مرکز دارای تعداد محدودی وسایل نقلیه است.
- به دلیل عدم قطعیت ذاتی در زمان وقوع شرایط اضطراری و در دسترس نبودن اطلاعات مورد نیاز کافی پارامترهای مدل این پارامترها در قالب سناریوهای مختلف ارائه شده و مقادیر آنها تحت سناریوهای مختلف تخمین زده می شود.
- کلیه اطلاعات مورد نیاز در هر سناریو احتمالی (شامل مواردی نظیر تقاضای کالا، زمان های حمل و نقل و درصد خرابی مسیرها) در دسترس هستند.

#### اندیس ها و مجموعه ها:

- $I$ : اندیس مجموعه مراکز توزیع بالقوه (  $i = 1, \dots, I$  )
- $J$ : اندیس مجموعه مشتریان (  $j = 1, \dots, J$  )
- $P_{ij}$ : مجموعه مسیرهای بین نقاط  $i$  و  $j$  (  $i \in I, j \in J$  )
- $U$ : اندیس مجموعه مکان های بالقوه نامزد شده برای احداث کارخانه (  $u = 1, \dots, U$  )
- $V$ : اندیس مجموعه وسایل نقلیه (  $v = 1, \dots, V$  )
- $K$ : اندیس مجموعه کالاها (  $k = 1, \dots, K$  )
- $T$ : اندیس دوره های زمانی (  $t = 1, \dots, T$  )
- $S$ : اندیس مجموعه سناریو (  $s = 1, \dots, S$  )

#### پارامترها:

- $q_i$ : احتمال خرابی پایگاه  $i$
- $P_s$ : احتمال رویداد سناریو  $s$  (  $\sum_s P_s = 1$  ) و  $p_s = \prod_i q_i \cdot \prod_i (1 - q_i)$
- $wts$ : هزینه هر تیم تعمیر در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$
- $C_i$ : هزینه بازگشایی مراکز توزیع بالقوه  $i$
- $S_u$ : هزینه بازگشایی کارخانه  $u$
- $CT_{ij}$ : هزینه جابه جایی خودرو در سطح اول (از  $u$  به  $i$ )
- $CC_{ij}$ : هزینه جابه جایی خودرو در سطح دوم (از  $i$  به  $j$ )
- $d_{jks}^t$ : تقاضای مشتری  $j$  برای کالای  $k$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$
- $t_{ijks}^t$ : زمان ارضای تقاضای کالا  $k$  از مرکز توزیع  $j$  به مشتری  $i$  توسط وسیله نقلیه  $v$  تحت سناریو  $s$
- $b_{uikvs}$ : زمان ارضای تقاضای کالا  $k$  از کارخانه  $u$  به مرکز توزیع  $i$  توسط وسیله نقلیه  $v$  تحت سناریو  $s$
- $h_{ijs}^p$ : درصد خرابی مسیر  $p$  بین نقاط  $i$  و  $j$  تحت سناریو  $s$

- $e_{ijs}^p$ : تعداد دوره های زمانی مورد نیاز برای تعمیر مسیر  $p$  بین مرکز توزیع  $i$  و مشتری  $j$  تحت سناریو  $s$
- $\tau_{jks}$ : جریمه هر کالای ارضانده  $k$  برای مشتری  $j$  تحت سناریو  $s$
- $F$ : حداکثر تعداد مراکز توزیع بالقوه
- $V_i$ : تعداد وسیله نقلیه در مرکز توزیع بالقوه
- $b_k$ : واحد حجم کالای
- $Q_v$ : ظرفیت هر وسیله نقلیه  $v$  برای جابه جایی کالای از مراکز به نقاط تقاضا

- $\psi_{ik}$ : میزان در دسترس کالا  $k$  در مرکز توزیع بالقوه  $i$
- $G$ : تعداد تیم های تعمیر در دسترس
- $H$ : ساعات عملیات در دسترس در هر دوره زمانی
- $M$ : عدد ثابت بزرگ
- $m$ : عدد ثابت کوچک
- $a_{is}$ : یک، اگر مرکز توزیع بالقوه  $i$  در سناریو  $s$  دچار خرابی شود؛ صفر، در غیر این صورت
- $M_{is}$ : یک، اگر مرکز توزیع بالقوه  $i$  در سناریوی  $s$  تأسیس شود؛ صفر، در غیر این صورت
- $Ma_{us}$ : یک، اگر کارخانه  $u$  در سناریوی  $s$  تأسیس شود؛ صفر، در غیر این صورت

- $z_{iks}$ : یک، اگر مشتری  $k$  تحت پوشش پایگاه  $i$  در سناریو  $s$  قرار بگیرد؛ صفر، در غیر این صورت
- $y_{ijts}^p$ : یک، اگر تیم تعمیر شروع به تعمیر مسیر  $p$  بین نقاط  $i$  و  $j$  تحت سناریو  $s$  و دوره زمانی  $t$  طی کند؛ صفر، در غیر این صورت
- $x_{ijvts}^p$ : یک، اگر وسیله نقلیه  $v$  مسیر  $p$  بین نقاط  $i$  و  $j$  (سطح دوم) تحت سناریو  $s$  و دوره زمانی  $t$  طی کند؛ صفر، در غیر این صورت
- $n_{iuts}^p$ : یک، اگر وسیله نقلیه  $v$  مسیر  $p$  بین نقاط  $u$  و  $i$  (سطح اول) تحت سناریو  $s$  و دوره زمانی  $t$  طی کند؛ صفر، در غیر این صورت
- $q_{ijkvts}$ : مقدار کالای ارسالی  $k$  توسط وسیله نقلیه  $v$  از  $i$  به  $j$  (سطح دوم) در دوره زمانی  $t$  و در سناریو  $s$ .
- $p_{uikvts}$ : مقدار کالای ارسالی  $k$  توسط وسیله نقلیه  $v$  از  $i$  به  $j$  (سطح اول) در دوره زمانی  $t$  و در سناریو  $s$ .
- $r_{ijts}^p$ : قابلیت اطمینان مسیر  $p$  بین نقاط  $i$  و  $j$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$ .
- $\mu_{jks}$ : مقدار کمبود کالای  $k$  در نقطه تقاضای  $j$  تحت سناریو  $s$ .

#### مدل ریاضی مسئله:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{s=1}^S P_s \left( \sum_{i=1}^I C_i M_{is} + \sum_{u=1}^U S_u Ma_{us} \right) \\ & + \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{v=1}^V n_{uivts}^p CT_{ui} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{v=1}^V x_{ijvts}^p CC_{ij} \quad (1) \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \tau_{jks} H_{jks} a_{is} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P w_{ts} e_{ijs}^p y_{ijts}^p \end{aligned}$$





مسیریابی خودرو در سطح اول از کارخانه به مراکز توزیع، مسیریابی در سطح دوم از مراکز توزیع به مشتریان، هزینه جریمه کلی تقاضای برآورده نشده و هزینه تعمیر مسیرها ایجاد شده است. هزینه تقاضای برآورده نشده برای هر کالا در هر نقطه تقاضا تلویحاً اولویت کالا را برای نقطه تقاضا از طریق اختصاص هزینه جریمه در صورت برآورده نشدن تقاضا در نظر می گیرد. تابع هدف (۲) متوسط زمان پاسخ وزن دار را برای کل سناریوهای ممکن حداقل می سازد. وزن ها مربوط به نسبت ارضای تقاضا به وسیله مراکز و کارخانه است. زمان واکنش عبارت است از زمان لازم برای حمل و نقل بین مرکز و نقطه تقاضا. این تابع هدف برای این منظور در نظر گرفته شده است تا مراکز برای سرویس دهی انتخاب شوند که در حداقل زمان تقاضای نقاط تقاضا را برآورده کند. تابع هدف (۳) حداقل قابلیت اطمینان استفاده از مسیرها را برای کل سناریوها حداکثر می کند.

محدودیت های (۴) تا (۶) محدودیت های قابلیت اطمینان هستند. قابلیت اطمینان هر مسیر باید براساس درصد خرابی در انتهای هر دوره زمانی و بعد از تکمیل تعمیر مسیر که فرض بر این است که مسیر کاملاً قابل اطمینان است (قابلیت اطمینان برابر یک خواهد بود) محاسبه شود. بنابراین محدودیت (۴) قابلیت اطمینان مسیرها را بعد از هر دوره زمانی محاسبه می کند. همچنین محدودیت (۵) تضمین می کند که مسیرها در طول بازه بازبایی نباید مورد استفاده قرار گیرند و محدودیت (۶) تعداد مسیرهای آسیب دیده ای که تعمیر می شوند را به تعداد تیم تعمیرات در دسترس محدود می کند.

محدودیت (۷) تضمین می کند که تنها مراکز موقت باز شده قابلیت خدمت رسانی به نقاط تقاضا را دارا هستند. محدودیت (۸) تضمین می کند که تنها کارخانه های باز شده قابلیت خدمت رسانی به نقاط مراکز را دارا هستند. محدودیت (۹) نیز نشان می دهد که تعداد مراکز باز شده نباید از تعداد مجاز پیشی گیرد. محدودیت (۱۰) محدودیت ظرفیت وسائل نقلیه است و نشان می دهد که بار وسائل نقلیه نباید بیشتر از ظرفیت مجاز آن باشد. محدودیت (۱۱) مجموع کالاهای تحویل شده به هر نقطه تقاضا و همچنین مقدار تقاضای برآورده نشده برای هر نقطه تقاضا را محدود می کند. محدودیت (۱۲) تضمین می کند که حداکثر یک مسیر بین مرکز موقت و نقطه تقاضا برای توزیع کالا در هر دوره زمانی باید استفاده شود و محدودیت (۱۳) نشان دهنده این است که عبور و مرور وسائل نقلیه مابین مرکز موقت و نقطه تقاضا در هر دوره زمانی باید از یک مسیر صورت گیرد. محدودیت (۱۴) نشان دهنده این است که عبور و مرور وسائل نقلیه مابین کارخانه و مرکز موقت در هر دوره زمانی باید از یک مسیر صورت گیرد. محدودیت (۱۵) نشان می دهد که هر وسیله نقلیه حداکثر یک بار در هر دوره زمانی می تواند خدمت رسانی کند. محدودیت (۱۶) تضمین می کند که تعداد وسائل نقلیه به کار گرفته شده در هر دوره زمانی از تعداد وسائل نقلیه در دسترس در مرکز بیشتر نیست. رابطه منطقی بین کالاهای تحویل داده شده به هر نقطه تقاضا و متغیرهای دودویی نظیرش در محدودیت (۱۷) نشان داده شده است و محدودیت (۱۸)

$$\text{Min } \sum_{s=1}^S p_s \left( \sum_{j=1}^J \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T q_{ijkvts} + b_{uikvs} \cdot p_{uikvts}}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T d_{jkts}} \right) \quad (2)$$

$$\text{Max } \sum_{s=1}^S p_s \left( \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T \min_{(i,j,p)} 2 \cdot r_{ijvs}^p x_{ijvs}^p \right) \quad (3)$$

$$r_{ijvs}^p = 1 - h_{ijvs}^p \left( 1 - \sum_{t=1}^{t-e_{ijvs}^p} y_{ijvs}^p \right) \quad \forall i, j, p, t, s \quad (4)$$

$$x_{ijvs}^p \leq 1 - \sum_{t=e_{ijvs}^p+1}^t y_{ijvs}^p \quad \forall i, j, p, k, t, s \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P y_{ijvs}^p + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=\min\{t-e_{ijvs}^p+1, 1\}}^{t-1} y_{ijvs}^p \leq G \cdot (1 - a_{is}) \quad \forall t, s \quad (6)$$

$$x_{ijvts}^p \leq M_{is} \cdot (1 - a_{is}) \quad \forall i, j, p, v, t, s \quad (7)$$

$$n^{p iuts} \leq M a_{us} \quad \forall i, p, u, t, s \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} M_{is} \leq F \quad \forall s \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P_j} \sum_{k \in K} b_k d_{jkts} x_{ijvts}^p \leq Q_v \quad \forall v, t, s \quad (10)$$

$$\mu_{jkts} + \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} q_{ijkvts} = d_{jkts} \quad \forall j, k, t, s \quad (11)$$

$$\sum_{p \in P_j} x_{ijts}^p \leq 1 \quad \forall i, j, t, s \quad (12)$$

$$x_{ijvts}^p \leq x_{ijts}^p \quad \forall i, j, p, v, t, s \quad (13)$$

$$n^{p uivts} \leq n^{p iuts} \quad \forall i, u, p, v, t, s \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P_j} x_{ijvts}^p \leq 1 \quad \forall v, t, s \quad (15)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{p \in P_j} \sum_{v \in V} x_{ijvts}^p \leq V_i \quad \forall i, t, s \quad (16)$$

$$q_{ijkvts} \leq M \sum_{p \in P_j} x_{ijvts}^p \quad \forall i, j, k, v, t, s \quad (17)$$

$$\sum_j \sum_v \sum_t q_{ijkvts} \leq \psi_{ik} \quad \forall i, k, s \quad (18)$$

$$2t_{ijkvs}^p x_{ijvts}^p \leq H \quad \forall i, j, p, v, t, s \quad (19)$$

$$n_{iuts}^p \leq M_{is} \cdot (1 - a_{is}) \quad \forall i, p, u, t, s \quad (20)$$

$$a_{is} \leq M_{is} \quad \forall i, s \quad (21)$$

$$r_{ijts}^p, q'_{ikts}, q_{ijkvts}, p_{uikvts} \geq 0 \quad \forall i, j, p, k, v, t, s \quad (22)$$

$$M_{is}, M a_{us}, x_{ijvts}^p, x_{ijts}^p, y_{ijts}^p \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, p, v, t, s \quad (23)$$

تابع هدف (۱) به منظور کمینه سازی هزینه های کلی شامل هزینه مکان یابی مراکز موقت، هزینه مکان یابی کارخانه ها،

## خطی‌سازی

در این مرحله تابع هدف غیرخطی  $\text{Max min}$  را می‌توان با یک روش ساده خطی کرد:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{s \in S} p_s \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \alpha_{vts} \\ r^p_{ijts} x^p_{ijts} & \geq \alpha_{vts} \quad \forall i, j, p, v, t \quad (29) \\ \alpha_{vts} & \geq 0 \end{aligned}$$

## روش حل دقیق

رویکرد حل مسئله یکی از اساسی‌ترین بخش‌های یک پژوهش است که این مهم به این بخش اختصاص یافته است. با توجه به تعریف و مدل ریاضی مسئله این پژوهش، روش حلی برای آن در نظر گرفته شده است. به منظور حل مسئله دو روش حل دقیق و حل فراابتکاری پیشنهاد شده است. نرم‌افزار گمز یک زبان مدل‌سازی برای توسعه و حل مدل‌های ریاضیاتی است. این نرم‌افزار به محققین اجازه می‌دهد تا مسائل پیچیده را به آسانی بیان کنند. این نرم‌افزار برای حل مدل‌های ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرد و از سرعت بالایی برای حل مدل‌های بزرگ برخوردار است. این نرم‌افزار مبنای حل دقیق برای مدل پیشنهادی این تحقیق است. این رویکرد در حقیقت به منظور حل مثال‌های واقعی طراحی نشده، بلکه هدف اعتبارسنجی مدل است. در بخش بعدی مدل با روش دقیق و با استفاده از این نرم‌افزار اعتبارسنجی خواهد شد. به این منظور با نرم‌افزار GAMS 24.1 بر روی کامپیوتر با ویژگی‌های Intel Core i7، پردازنده ۲٫۶ گیگاهرتز و حافظه ۶ گیگابایت حل شده است. البته از آنجا که در ادبیات مدلی مانند مدل ارائه شده وجود با مفروضات موجود ارائه نشده، مقادیر تعدادی از پارامترهای مدل به صورت فرضی و تجزیه و تحلیل از عملکرد مدل ارائه شده است.

## روش محدودیت اپسیلون<sup>۸</sup>

یکی از روش‌های دقیق به دست آوردن حل‌های پارتوی بهینه استفاده از روش محدودیت اپسیلون است که اولین بار توسط آلدان ارائه شده است. مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روش‌ها بهینه‌سازی چندهدفه کاربرد آن برای فضاهای حل غیرمحدب است. زیرا در روش‌هایی از قبیل ترکیب وزنی اهداف در فضای نامحدب کارایی خود را از دست می‌دهند. زمان محاسباتی یک الگوریتم از ویژگی‌های مهم هر الگوریتم جهت ارزیابی آن است. از آنجایی که یکی از ضعف‌های اساسی الگوریتم‌های مبتنی بر جستجوی دقیق از جمله روش اپسیلون محدودیت بالا بودن زمان محاسباتی آنهاست، بدیهی است که به کارگیری الگوریتم فراابتکاری موجب کاهش شدید زمان محاسباتی خواهد شد.

برای اعتبارسنجی مدل ریاضی ارائه شده مسئله‌ای در اندازه کوچک تولید و توسط روش حل دقیق در قسمت مطالعه موردی حل شده است. از آنجایی که نشان داده شده، هر دو زیر مسئله مکان‌یابی و مسیریابی NP-hard است، لذا ترکیب این دو (مسئله

محدودیت ظرفیت مراکز است؛ بدین معنا که کل کالای برده شده به هر نقطه تقاضا در کل افق زمانی نباید از ظرفیت در دسترس مرکز برای آن کالا بیشتر باشد. محدودیت (۱۹) تضمین می‌کند که زمان ارضای تقاضای مورد نیاز توسط مرکز در هر نقطه تقاضا تخصیص داده شده به هر وسیله نقلیه از ساعات عملیاتی مجاز در هر دوره زمانی نباید بیشتر باشد. محدودیت‌های (۲۰) تا (۲۱) بیان می‌کند که تنها مراکز توزیع باز قابل دریافت کالا از کارخانه هستند و امکان اختلال در آن‌هاست. محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) نوع متغیرها را مشخص می‌کنند. همچنین تصمیم‌گیرنده می‌تواند میزان مورد نیاز کالای  $k$  در مرکز  $i$  به ازای هر سناریو ( $q'_{ikts}$ ) را می‌تواند به صورت زیر محاسبه کند:

$$q'_{ikts} = \sum_{j \in J} \sum_{v \in V} q_{ijkvts} \quad \forall i, k, t, s \quad (24)$$

## برابری<sup>۷</sup>

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در بیشتر موارد در شرایط اضطراری با مقیاس بزرگ میزان کالای در دسترس به منظور برآورده کردن تمامی تقاضاها کافی نیستند. از این رو برابری و عدالت یکی از مفاهیم مهمی است که اخیراً در ادبیات موضوع در نظر گرفته شده است. در این تحقیق برابری با در نظر گرفتن نرخ پرسازی برای همه نقاط تقاضا ارضا می‌شود. در این جا فرض شده که  $D_{kt}$  و  $d'_{jkt}$  به ترتیب نشان‌دهنده مقدار در دسترس کالای  $k$  در دوره زمانی  $t$  و مقدار تحویل داده شده کالای  $k$  به نقطه تقاضای  $j$  در دوره زمانی  $t$  هستند. بنابراین نرخ پرسازی نقطه تقاضای  $j$  برای کالای  $k$  در دوره زمانی  $t$  ( $Fr_{jkt}$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Fr_{jkt} = \frac{d'_{jkt}}{D_{kt}} \quad (25)$$

همچنین می‌توان معادلات (۲۶) و (۲۷) را بر اساس تساوی نرخ پرسازی و این واقعیت که مجموع کالاهای تحویل داده شده باید با کالای در دسترس در هر دوره برابر باشد، به صورت زیر بیان کرد:

$$Fr_{jkt} = Fr_{j'kt} \quad \forall j, j' \in J, k, t \quad (26)$$

$$\sum_{j \in J} d'_{jkt} = D_{kt} \quad \forall k, t \quad (27)$$

با توجه به معادلات (۲۵) تا (۲۷) مقدار تحویل داده شده کالای  $k$  به نقطه تقاضای  $j$  در دوره زمانی  $t$  ( $d'_{jst}$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d'_{jst} = \frac{d_{jkt}}{\sum_{j \in J} d_{jkt}} D_{kt} \quad \forall j, k, t \quad (28)$$

بنابراین برای دستیابی به برابری در همه نقاط تقاضا باید  $d'_{jst}$  را به ازای هر سناریو محاسبه و به جای  $d'_{jst}$  در محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) قرار داد.

مکان یابی-مسیریابی) جز کلاس NP-hard است. بنابراین با تغییر تعداد محدودیت ها زمان حل به صورت نمایی رشد می کند، نرم افزار GAMS در ابعاد بالا قابلیت حل خود را از دست می دهد. به همین منظور برای حل مدل در ابعاد بزرگ از روش حل فراابتکاری استفاده خواهد شد. در این تحقیق برای حل مدل سه هدفه از الگوریتم فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) استفاده شده است. در ادامه جزئیات مربوط به الگوریتم آورده شده است.

## الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

### نمایش جواب نشدنی

فرض کنید در یک منطقه ۸ مرکز توزیع بالقوه و ۸ نقطه تقاضا داریم. آرایه زیر را در نظر بگیرید:

$$[0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0]$$

تعداد اعضای این آرایه برابر است با تعداد مراکز توزیع بالقوه که از ۱ تا ۸ شماره گذاری شده اند. نقاط تقاضا هم از ۹ تا ۱۶ شماره گذاری شده اند. اعداد این آرایه به طور تصادفی در هر تکرار مقدار صفر و یک می گیرند. صفر در این آرایه بدین معناست که مرکز بالقوه تأسیس نشده و یک به معنای تأسیس مرکز توزیع است. بنابراین در آرایه فوق مراکز توزیع ۲، ۳، ۵، ۷ تأسیس شده اند. در ادامه نزدیک ترین نقاط تقاضا به این مراکز تخصیص داده می شوند. فرض کنید نقاط تقاضای ۱۰ و ۹ به مرکز توزیع ۲، نقاط ۱۱ و ۱۲ به مرکز ۳ و نقاط ۱۳ و ۱۴ به مرکز ۵ و نقاط ۱۵ و ۱۶ به مرکز ۷ تخصیص داده شوند. یک راه حل شدنی برای این مسئله به شکل زیر است:

$$2-9-10-2-3-11-12-3-5-13-14-7-15-16-7$$

### عملگر تقاطع

این عملگر برای جست و جوی محلی در فضا پاسخ است. انواع مختلف عملگرهای تقاطع مانند تک نقطه ای، دو نقطه ای و چند نقطه ای داریم. در این مقاله از عملگر دو نقطه ای استفاده شده است.

فرض کنید Parent1 و Parent2 نشان دهنده والد اول و والد دوم، CrossPoint نقطه تقاطع، Offspring1 و Offspring2 فرزند اول و فرزند دوم باشند. فرزند اول از قسمت اول والد اول و قسمت دوم والد دوم والد اول و فرزند دوم از قسمت اول والد دوم و قسمت دوم والد اول با توجه به نقطه تقاطع تشکیل می شود. مثلا نحوه قرار گرفتن تازه مراکز توزیع به صورت زیر است:

$$\begin{array}{l} \text{parent1} \quad [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0] \\ \text{Parent2} \quad [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1] \\ \text{Offspring1} [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0] \\ \text{Offspring2} [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1] \end{array}$$

### عملگر جهش

بعد از آنکه عملگر تقاطع روی مراکز توزیع اولیه (Parent) صورت گرفت، باید از عملگر جهش بر روی مراکز توزیع تازه تولید شده (Offspring) استفاده کرد. ابتدا به صورت تصادفی از

آرایه های تازه نمونه هایی انتخاب می شوند و سپس برای آرایه های تازه جای دو مقدار به صورت تصادفی با هم جابجا می شوند که موجب جهش در فضای پاسخ می شود.

$$\text{Offspring1} = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

آرایه جهش یافته به صورت زیر خواهد شد:

$$\text{MutatedBase} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$$

### عملگر انتخاب

برای تولید نسل تازه از عملگر انتخاب چرخ رولت استفاده می شود. درصد هر بخش با استفاده از طراحی آزمایشات تاگوچی به دست آمده است. شبه کد الگوریتم ژنتیک استفاده شده به این صورت است:

پارامترهای اولیه را مشخص کن  
جمعیت اولیه را به صورت تصادفی تولید کن.  
مقدار تابع هدف را برای هر یک از جواب ها حساب کن.  
برای  $i=1$  تا تعداد نسل ها تکرار کن  
برنامه تورها را انتخاب کن  
تورهای تازه را بر اساس عملگرهای ادغام و جهش تولید کن  
مقدار تابع هدف را برای تورهای تازه محاسبه کن  
اعضای نسل تازه را از داخل نسل قبل و تورهای تازه ایجاد شده انتخاب کن.  
پایان

### شاخص های ارزیابی الگوریتم

**شاخص کیفیت:** این شاخص نشان دهنده سهم هر الگوریتم در مجموعه جواب های پارتو حاصل از ترکیب جواب های پارتوی کلیه روش هاست. این شاخص هر چه بیشتر باشد، بهتر است.

**شاخص فاصله از نقطه ایده آل:** فرمول ریاضی این شاخص برابر است با:

$$DIM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\left( \frac{\sum_{j=1}^n \frac{f_j^i - f_j^{best}}{f_{j,total}^{max} - f_{j,total}^{min}}}{\sum_{j=1}^n \frac{f_j^i - f_j^{best}}{f_{j,total}^{max} - f_{j,total}^{min}}} \right)^2} \quad (30)$$

که در آن n برابر تعداد نقاط پارتو، زاندیس تابع هدف،  $f_{1,total}^{max}$  و  $f_{1,total}^{min}$  به ترتیب برابر کمترین و بیشترین مقادیر تابع هدف ز در تمام روش هاست.  $f_j^i$  و  $f_j^{best}$  نیز به ترتیب برابر مقدار ایده آل تابع هدف زام و مقدار تابع هدف زام در الگوریتم مورد بررسی هستند. این شاخص هر چه پایین تر باشد، بهتر است.

**شاخص گوناگونی:** این شاخص وسعت جواب های پارتو ارائه شده توسط یک الگوریتم را می سنجد.

$$DM = \sqrt{\left( \frac{\sum_{j=1}^n \frac{f_j^{max} - f_j^{min}}{f_{j,total}^{max} - f_{j,total}^{min}}}{\sum_{j=1}^n \frac{f_j^{max} - f_j^{min}}{f_{j,total}^{max} - f_{j,total}^{min}}} \right)^2} \quad (31)$$

که در آن زاندیس تابع هدف،  $f_{1,total}^{max}$  و  $f_{1,total}^{min}$  به ترتیب برابر کمترین و بیشترین مقادیر تابع هدف ز در تمام روش هاست.  $f_j^{min}$  و  $f_j^{max}$  نیز به ترتیب برابر بیشترین و کمترین مقادیر تابع هدف ز



ام در الگوریتم مورد بررسی هستند. این شاخص هرچه بهتر باشد، بهتر است.

**شاخص فاصله:** این شاخص یکنواختی توزیع جواب‌های پارتو در فضای حل را نشان می‌دهد.

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{d} - d_i|}{(n-1)\bar{d}} \quad (32)$$

که در آن  $d_i$  برابر با فاصله اقلیدسی بین دو جواب کناری در فضای حل و  $\bar{d}$  برابر میانگین این فواصل است. این شاخص هر چه بیشتر باشد، مطلوبیت الگوریتم بیشتر است.

زمان اجرای الگوریتم: زمان اجرای هر الگوریتم مدت زمانی است که طول می‌کشد تا هر الگوریتم به شرط خاتمه برسد.

### طراحی آزمایش‌ها برای تنظیم پارامترها

پارامترهای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در این مقاله نرخ جهش، نرخ تقاطع، جمعیت و تعداد تکرارها هستند. جدول (۱) مقادیر پارامترها در ۳ سطح را نشان می‌دهد:

با طراحی آزمایشات به تاگوجی به وسیله نرم‌افزار مینی‌تب ۹ آزمایش طراحی شد. به‌طور میانگین و بعد از ۴ بار اجرا مقادیر مطابق جدول (۲) به دست آمد.

و با رسم نمودار S/N مقدار بهینه پارامترها به این صورت به‌دست آمد: جمعیت (Npop) و تکرار (It) در سطح ۱ و نرخ تقاطع (Pc) در سطح ۳ و نرخ جهش (Pm) در سطح ۲ قرار دارد.

### حل مسئله نمونه

در این بخش نتایج محاسباتی الگوریتم NSGA-II طراحی شده و همچنین نتایج حاصل از نرم‌افزار گمز برای یک مسئله نمونه ارائه می‌شود. برای  $I=4$  و  $J=4$  و  $U=4$ . برای حل مسئله با نرم‌افزار گمز از روش محدودیت اسپیلون استفاده شده که می‌توان با حذف جواب‌های مغلوب جواب‌های پارتو را شناسایی کرد. همچنین الگوریتم NSGA-II برای حل مسئله به‌کاررفته که خروجی آن تعدادی از جواب‌های پارتو است. جواب‌های پارتو حاصل از این دو روش مطابق جدول (۳) است. لازم به ذکر است که پارامترهای الگوریتم مطابق آنچه در بخش تنظیم پارامتر به‌دست آمد، فرض شده‌اند که در جدول (۴) آمده است.

### حل مسئله در ابعاد مختلف

در این بخش به منظور بررسی عملکرد ۲ الگوریتم ۵ مسئله در ابعاد مختلف تولید می‌شود و هر مسئله ۵ بار اجرا می‌شود. شاخص‌هایی که برای ارزیابی دو روش انتخاب شده عبارتند از

جدول ۱- پارامترها و سطوح آن‌ها

	Mu	Pc	It	Npop	
سطح ۱	۰.۱۵	۰.۶۵	۲۰۰	۵۰	
سطح ۲	۰.۲	۰.۷۵	۳۰۰	۱۰۰	
سطح ۳	۰.۲۵	۰.۸	۵۰۰	۱۵۰	

جدول ۴- پارامترهای اصلی مسئله

مسئله	۱	۲	۳	۴	۵
U	۴	۵	۱۰	۱۰	۱۵
J	۴	۵	۵	۷	۸
I	۴	۵	۵	۲	۸

جدول ۲- خلاصه نتایج نرمال شده برای ۴ اجرا

آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
Sum۱	۲.۶۶	۲.۶۱	۲.۵۸	۲.۶	۲.۲۱	۲.۵۴	۲.۸۴	۱.۸	۲.۱۱
Sum۲	۳.۲۷	۲.۴۲	۳.۴۵	۲.۷۷	۲.۵۶	۲.۲۹	۲.۶۴	۱.۸۷	۱.۹
Sum۳	۳.۴	۲.۲۸	۲.۶۱	۲.۹۹	۲.۴۶	۲.۲۳	۲.۶۷	۲.۰۲	۱.۹۲
Sum۴	۳.۰۱	۲.۶۹	۲.۵۷	۲.۷۴	۲.۰۷	۲.۴۳	۲.۷۸	۱.۹۸	۲.۰۳

جدول ۳- جواب‌های پارتو

قابلیت اطمینان	متوسط زمان پاسخ	هزینه	جواب	
۰.۷۸	۱۲.۹	۷۴۳۹۰۵۶	۱	ژنتیک
۰.۵۶	۱۸.۱	۴۰۵۵۹۴۲	۲	
۰.۵۰	۱۵.۸	۴۰۴۶۸۳۶	۳	
۰.۵۹	۱۶.۱	۴۰۴۲۵۱۲	۴	
۰.۷۶	۱۱.۴	۷۴۳۱۸۲۱	۵	
۰.۶۷	۱۳.۲	۵۸۲۹۵۴۶	۶	گمز
۰.۶۲	۱۷.۵	۴۰۴۳۵۳۵	۷	

جدول ۵- نتایج مقایسه‌ای شاخص‌های ارزیابی

NSGA-II			Gams			اجرا	مسئله
گوناگونی	فاصله	کیفیت	گوناگونی	فاصله	کیفیت		
۰.۹۱	۰.۵۴	۰.۵۶	۰.۵۵	۰.۱۲	۰.۴۱	۱	۱
۰.۹۰	۰.۶۴	۰.۵۶	۰.۸۵	۰.۲۲	۰.۴۲	۲	
۱.۴۹	۰.۹۶	۰.۵۰	۱.۳۶	۰.۴۴	۰.۵۰	۳	
۰.۰۰	۰.۷۵	۰.۶۰	۱.۷۰	۰.۱۶	۰.۳۸	۴	
۰.۰۷	۰.۰۰	۰.۴۱	۰.۶۶	۰.۲۶	۰.۵۰	۵	
۰.۸۰	۰.۳۶	۰.۴۶	۰.۸۱	۰.۸۰	۰.۵۰	۱	۲
۱.۲۸	۰.۷۵	۰.۵۸	۱.۴۱	۰.۳۱	۰.۴۰	۲	
۱.۵۳	۰.۶۱	۰.۷۸	۱.۰۴	۰.۳۷	۰.۱۹	۳	
۰.۹۹	۰.۵۲	۰.۵۶	۱.۱۶	۰.۴۵	۰.۳۸	۴	
۰.۹۸	۰.۵۲	۰.۶۱	۰.۵۲	۰.۳۳	۰.۳۶	۵	
۱.۳۳	۰.۷۱	۰.۶۷	۱.۰۷	۰.۶۱	۰.۳۲	۱	۳
۱.۲۵	۰.۸۷	۰.۶۱	۱.۲۲	۰.۸۱	۰.۳۶	۲	
۰.۵۲	۰.۳۶	۰.۳۳	۰.۸۵	۰.۳۷	۰.۶۴	۳	
۱.۴۷	۰.۸۳	۰.۶۲	۱.۳۰	۰.۲۴	۰.۳۷	۴	
۰.۲۱	۰.۱۵	۰.۵۸	۰.۷۱	۰.۰۰	۰.۴۱	۵	
۱.۴۲	۰.۴۱	۰.۴۷	۱.۱۴	۰.۴۲	۰.۴۹	۱	۴
۱.۲۸	۰.۸۴	۰.۶۸	۱.۱۲	۰.۱۸	۰.۳۲	۲	
۰.۰۰	۰.۳۲	۰.۳۱	۰.۷۵	۰.۷۰	۰.۶۵	۳	
۰.۰۰	۰.۰۳	۰.۸۷	۱.۲۰	۰.۱۱	۰.۱۲	۴	
۰.۰۰	۰.۴۲	۰.۷۴	۱.۱۱	۰.۲۷	۰.۲۱	۵	
۰.۰۰	۰.۰۰	۱.۰۰	۰.۷۱	۰.۴۰	۰.۰۰	۱	۵
۰.۲۷	۰.۱۵	۰.۵۹	۰.۳۲	۰.۴۷	۰.۳۹	۲	
۰.۰۰	۰.۰۸۱	۰.۵۷	۱.۵۱	۰.۲۲	۰.۳۷	۳	
۱.۳۰	۰.۶۴	۰.۶۷	۰.۶۴	۰.۰۰	۰.۳۱	۴	
۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۷۱	۱.۴۰	۰.۳۲	۰.۲۱	۵	
۰.۷۲۰۰	۰.۴۵۵۲	۰.۶۰۱۶	۱.۰۰۰۰	۰.۳۴۳۲	۰.۳۶۸۴		میانگین

۴۰

شماره نوزدهم  
بهار و تابستان  
۱۴۰۰

دوفصلنامه  
پژوهشی

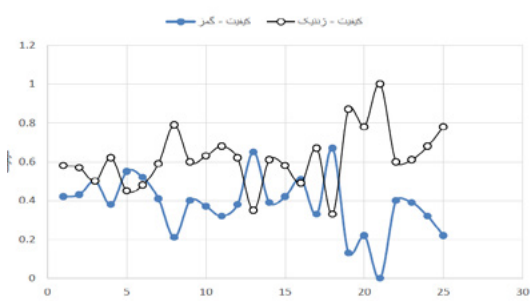


مدل‌سازی ریاضی برای مسئله مکان‌یابی-مسیر یابی دو سطحی  
در زنجیره تامین مواد غذایی فساد پذیر با ریسک اختلاف

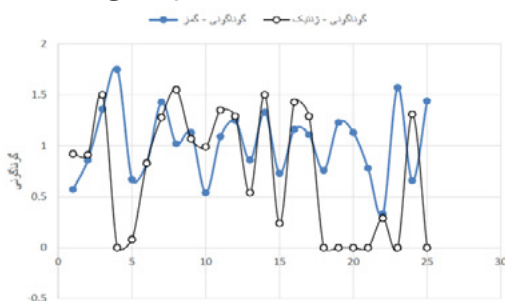
کیفیت، فاصله و گوناگونی که در جدول (۵) ارائه می‌شود. هر یک از شاخص‌ها هر چه بیشتر باشند، مطلوبیت روش بیشتر است. نمودارهای ۱ الی ۳ مقایسه‌ای شاخص‌های ارزیابی را نشان می‌دهند. هر یک از شاخص‌ها هر چه بیشتر باشند، مطلوبیت روش بیشتر است.

### تحلیل حساسیت پارامترهای ضروری

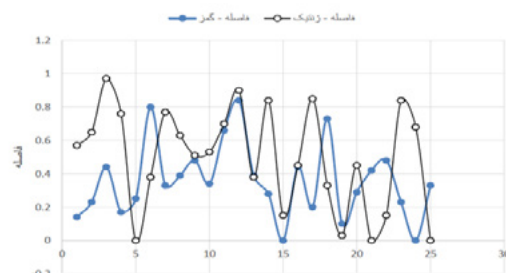
در این بخش جهت ارائه چشم‌اندازهای مدیریتی چندین تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای اساسی مسئله مزبور صورت



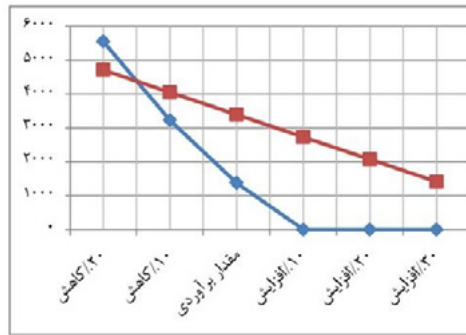
نمودار ۱- مقایسه‌ای برای شاخص ارزیابی کیفیت



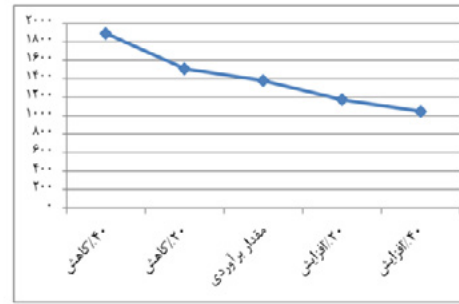
نمودار ۳- مقایسه‌ای برای شاخص ارزیابی گوناگونی



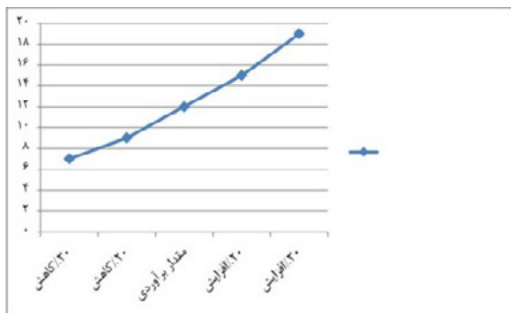
نمودار ۲- مقایسه‌ای برای شاخص ارزیابی فاصله



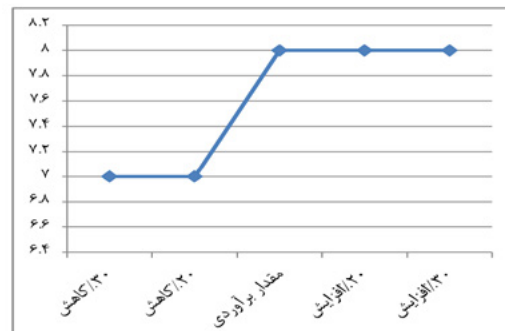
نمودار ۵- تحلیل حساسیت کمبود کالا و مراکز خدمت‌دهی نشده نسبت به ظرفیت وسایل نقلیه



نمودار ۴- تحلیل حساسیت کمبود کالا نسبت به ظرفیت مراکز توزیع



نمودار ۷- تحلیل حساسیت تعداد مراکز احداث شده نسبت به تعداد نقاط تقاضا



نمودار ۶- تحلیل حساسیت تعداد مراکز توزیع احداث شده نسبت به تقاضای کالا

### مطالعه موردی

کارایی مدل پیشنهادی با استفاده از اطلاعات واقعی (شامل نواحی ده‌گانه منطقه یک شهر تهران) مورد آزمون قرار می‌گیرد. جدول (۶) سناریوهای مختلفی که برای وقوع در منطقه یک شهر تهران تعریف شده‌اند، همچنین احتمال وقوع آن‌ها را نشان می‌دهد. جدول (۷) مجموعه کارخانه‌ها و جدول (۸) مجموعه نقاط بالقوه برای احداث مراکز توزیع کالاها را نشان می‌دهد. این مراکز می‌توانند در ۳ اندازه کوچک، متوسط و بزرگ احداث شوند که هر یک ظرفیت و هزینه‌های احداث متفاوت و مشخصی دارند. مجموعه نقاط تقاضا مناطق در جدول (۹) آورده شده‌اند. جدول (۱۰) برآورد پارامترها تحت سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. در جدول (۱۱) یکی از نتایج مسئله تخصیص مشتری به هر یک از پایگاه‌ها بیان شده است. میزان کمبود کالا در هر یک از نقاط تقاضا در جدول (۱۲) آورده شده و جدول شماره (۱۳) جواب متغیرهای باینری مسئله است. جواب مسیریابی خودروها در هر سناریو با احتمال ریسک اختلال در نقاط مورد بررسی در جدول (۱۴) بیان شده است.

گرفته است. هدف از تحلیل حساسیت، بررسی اثر ایجاد تغییر در پارامترهای ضروری یک مدل ریاضی در جواب نهایی است. علت اهمیت بحث تحلیل حساسیت در این است که در دنیای واقعی پارامترهای مدل تغییر می‌کنند و این تغییرات مربوط به شرایط محیطی است. با توجه به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر مدل و بررسی تحلیل حساسیت‌های صورت گرفته برای مقالات این حوزه مهمترین پارامترهای موجود جهت بررسی برای مدل‌های ارائه شده شامل پارامترهای ظرفیت مراکز تسهیلات، ظرفیت وسایل نقلیه و مقادیر تقاضا پرداخته می‌شود. کاهش ظرفیت مراکز توزیع باعث افزایش در مقادیر کمبود کالا شده و افزایش ظرفیت این مراکز مقادیر کمبود کالا را کاهش می‌دهد؛ همان‌طور که در نمودار (۴) نشان داده می‌شود.

تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات ظرفیت وسایل نقلیه برای حمل انواع کالا نیز نشان‌دهنده تأثیرپذیری از این پارامتر است، طوری که می‌تواند باعث افزایش یا کاهش نقاط تقاضای خدمت‌رسانی نشده شود (نمودار ۵). رابطه تقاضای کالا با تعداد مراکز توزیع احداث شده در نمودار (۶) و تعداد مراکز احداث شده با تعداد نقاط تقاضا در نمودار (۷) نشان داده می‌شود.

جدول ۶- احتمال وقوع سناریوهای مختلف

سناریوی اختلال		۱		۲		۳	
زمان وقوع اختلال		روز	شب	روز	شب	روز	شب
احتمال وقوع		۰,۲۷۴۷	۰,۱۳۷۴	۰,۲۳۴۳	۰,۱۱۷۲	۰,۱۰۵۱	۰,۰۵۲۵
درصد اختلال		۴۰,۵		۲۴,۳		۴۲,۴	

جدول ۷ - مجموعه کارخانه‌ها

ردیف	نام منطقه	محل کارخانه
u <sub>1</sub>	۱	ازگل
u <sub>2</sub>	۲	سعادت آباد
u <sub>3</sub>	۳	ولیعصر (پارک ملت)
u <sub>4</sub>	۴	وفادار (پارک پلیس)

جدول ۹ - مجموعه نقاط تقاضا

ردیف	نام ناحیه	مجموعه نقاط تقاضا
j <sub>1</sub> j <sub>2</sub>	۱	حصار بوعلی فرمانیه
j <sub>3</sub> j <sub>4</sub> j <sub>5</sub>	۲	اوین ولنجک زعفرانیه
j <sub>6</sub> j <sub>7</sub>	۳	دربند امام زاده قاسم
j <sub>8</sub> j <sub>9</sub> j <sub>10</sub>	۴	دزاشیب جماران نیاوران
j <sub>11</sub> j <sub>12</sub>	۵	کاشانک دارآباد
j <sub>13</sub> j <sub>14</sub> j <sub>15</sub>	۷	باغ فردوس تجربش قیطره
j <sub>16</sub> j <sub>17</sub>	۸	چندر حکمت
j <sub>18</sub> j <sub>19</sub>	۹	اراج ازگل

جدول ۸ - مجموعه مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز توزیع

ردیف	نام ناحیه	مراکز توزیع کالا
i <sub>1</sub>	۱	فرمانیه
i <sub>2</sub>	۲	اوین
i <sub>3</sub>	۳	گلابدره
i <sub>4</sub>	۴	جماران
i <sub>5</sub>	۵	اراج
i <sub>6</sub>	۷	تجربش
i <sub>7</sub>	۸	چندر
I <sub>8</sub>	۹	ازگل

پارامترهای مورد استفاده در سناریوهای گوناگون طبق جدول (۱۰) است.

جدول ۱۰ - برآورد پارامترها تحت سناریوهای مختلف

ناحیه	نقاط تقاضا	سناریوها	$d_{jks}$	$t_{ijkvs}$	$h^p_{ijs}$	$\tau_{jks}$
۱	حصار بوعلی فرمانیه	سناریو ۱	۱۰۱۰	۵۰۷	٪۲	۱۰۰
		سناریو ۲	۱۵۴۶	۷۹۱	٪۵	۲۰۰
		سناریو ۳	۱۵۰۰	۵۰۰	٪۱۰	۳۰۰
۲	اوین ولنجک زعفرانیه	سناریو ۱	۴۷۸	۱۹۸	٪۲	۱۰۰
		سناریو ۲	۱۰۵۴	۵۶۲	٪۵	۲۰۰
		سناریو ۳	۱۸۹۴	۸۶۴	٪۱۰	۳۰۰
۳	دربند امام زاده قاسم	سناریو ۱	۱۱۱۵	۴۰۷	٪۲	۱۰۰
		سناریو ۲	۱۵۶۲	۷۰۲	٪۵	۲۰۰
		سناریو ۳	۱۸۹۰	۶۰۰	٪۱۰	۳۰۰
۴	دزاشیب جماران	سناریو ۱	۱۲۱۴	۵۸۹	٪۲	۱۰۰
		سناریو ۲	۹۳۶	۳۷۳	٪۵	۲۰۰
		سناریو ۳	۱۱۰۱	۴۷۳	٪۱۰	۳۰۰
۵	کاشانک دارآباد	سناریو ۱	۱۶۳۵	۸۶۴	٪۲	۱۰۰
		سناریو ۲	۶۴۳	۲۳۲	٪۵	۲۰۰
		سناریو ۳	۱۵۰۰	۳۰۰	٪۱۰	۳۰۰
۷	باغ فردوس تجربش قیطره	سناریو ۱	۱۵۹۹	۷۷۵	٪۲	۱۰۰
		سناریو ۲	۱۸۴۵	۸۵۸	٪۵	۲۰۰
		سناریو ۳	۱۰۵۶	۴۸۰	٪۱۰	۳۰۰
۸	حکمت چندر	سناریو ۱	۱۷۵۸	۶۸۷	٪۲	۱۰۰
		سناریو ۲	۱۲۹۰	۶۲۷	٪۵	۲۰۰
		سناریو ۳	۱۸۰۰	۷۰۰	٪۱۰	۳۰۰
۹	اراج ازگل	سناریو ۱	۴۳۴	۴۵۴	٪۲	۱۰۰
		سناریو ۲	۳۸۶	۲۹۵	٪۵	۲۰۰
		سناریو ۳	۱۵۰۰	۷۰۰	٪۱۰	۳۰۰

جدول ۱۱- تخصیص مشتری به پایگاه

نام ناحیه	نقاط تقاضا	سناریوها	فرمانیه	اوین	گلابدره	جماران	اراج	تجربیش	چیدر	ازگل
۱	حصار بوعلی فرمانیه	سناریو ۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
		سناریو ۲	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
		سناریو ۳	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱
۲	اوین ولنجک زعفرانیه	سناریو ۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱
		سناریو ۲	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰
		سناریو ۳	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰
۳	دریند امام زاده قاسم	سناریو ۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰
		سناریو ۲	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰
		سناریو ۳	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰
۴	دزاشیب جماران نیاوران	سناریو ۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰
		سناریو ۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
		سناریو ۳	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰
۵	کاشانک دارآباد	سناریو ۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
		سناریو ۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
		سناریو ۳	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰
۷	باغ فردوس تجربیش قیطریه	سناریو ۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰
		سناریو ۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
		سناریو ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۸	حکمت چیدر	سناریو ۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱
		سناریو ۲	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰
		سناریو ۳	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰
۹	اراج ازگل	سناریو ۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱
		سناریو ۲	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱
		سناریو ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۳- متغیرهای باینری

ناحیه	سناریوها	$M_{is}$	$a_{is}$	$Ma_{us}$
۱	سناریو ۱	۱	۱	۱
	سناریو ۲	۰	۰	۱
	سناریو ۳	۱	۱	۱
۲	سناریو ۱	۱	۰	۱
	سناریو ۲	۰	۱	۱
	سناریو ۳	۱	۱	۱
۳	سناریو ۱	۱	۱	۱
	سناریو ۲	۰	۰	۰
	سناریو ۳	۱	۰	۱
۴	سناریو ۱	۱	۰	۰
	سناریو ۲	۰	۱	۰
	سناریو ۳	۱	۱	۱
۵	سناریو ۱	۱	۰	۱
	سناریو ۲	۰	۰	۰
	سناریو ۳	۱	۱	۰
۶	سناریو ۱	۱	۱	۱
	سناریو ۲	۰	۱	۰
	سناریو ۳	۱	۰	۱
۷	سناریو ۱	۱	۱	۱
	سناریو ۲	۰	۰	۰
	سناریو ۳	۱	۱	۰
۸	سناریو ۱	۱	۰	۱
	سناریو ۲	۰	۰	۰
	سناریو ۳	۱	۰	۰

جدول ۱۲- میزان کمبود کالا در نقطه تقاضا

ناحیه	نقاط تقاضا	سناریوها	کمبود
۱	حصار بوعلی فرمانیه	سناریو ۱	۵۰
		سناریو ۲	۴۰
		سناریو ۳	۴۰
۲	اوین ولنجک زعفرانیه	سناریو ۱	۳۰
		سناریو ۲	۳۰
		سناریو ۳	۳۰
۳	دریند امامزاده قاسم	سناریو ۱	۱۰
		سناریو ۲	۱۰
		سناریو ۳	۱۰
۴	دزاشیب جماران	سناریو ۱	۱۰
		سناریو ۲	۱۵
		سناریو ۳	۲۰
۵	کاشانک دارآباد	سناریو ۱	۲۵
		سناریو ۲	۲۰
		سناریو ۳	۲۰
۷	باغ فردوس تجربیش قیطریه	سناریو ۱	۰
		سناریو ۲	۰
		سناریو ۳	۱۰
۸	حکمت چیدر	سناریو ۱	۱۰
		سناریو ۲	۱۰
		سناریو ۳	۱۰
۹	اراج ازگل	سناریو ۱	۴۰
		سناریو ۲	۴۰
		سناریو ۳	۴۰

۴۳

شماره نوزدهم  
بهار و تابستان  
۱۴۰۰

دوفصلنامه  
پژوهشی



مدل سازی ریاضی برای مسئله مکان یابی - مسیریابی دو سطحی  
در زنجیره تامین مواد غذایی فساد پذیر با ریسک اختلال

جدول ۱۴- مسیریابی خودروها

مسیرها $x_{ijvts}^p$								سناریوها
۹-۷	۷-۸	۸-۶	۶-۵	۵-۳	۳-۴	۴-۲	۲-۱	سناریو ۱
۹-۷	۷-۶	۶-۸	۸-۵	۵-۳	۳-۴	۴-۲	۲-۱	سناریو ۲
۹-۷	۷-۸	۸-۶	۶-۵	۵-۳	۳-۴	۴-۲	۲-۱	سناریو ۳

## نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به مسئله مکان‌یابی کارخانه‌ها و مراکز توزیع و مسیریابی وسایل نقلیه و همچنین امکان تخریب مسیرهای ارتباطی و اختلال در مراکز توزیع پرداخته شد. هر یک از مراکز توزیع با احتمال مشخصی در سناریوهای مختلف دچار اختلال می‌شوند و هر یک از کمان‌های شبکه که مسیرهای ارتباطی را شکل می‌دهند، با احتمال مشخصی در زمان مسدود می‌شوند. این احتمال با توجه به عواملی مانند شرایط جغرافیایی و یا نوع زیرسازی‌ها و مصالح به‌کاررفته در ساخت کمان مشخص می‌شود. مدل ریاضی ارائه شده ضمن تعیین مکان استقرار تسهیلات و تعیین شیوه تخصیص مشتریان به آن‌ها مسیرهای بهینه خدمت‌رسانی را به گونه‌ای تعیین می‌کند که نرخ تعداد مشتریان پوشش داده نشده و میانگین زمانهای سفر در واحد زمان کمینه شوند. شبکه زنجیره تأمین طراحی شده باید قابلیت پاسخ‌دهی به نیازهای مشتریان را هنگام وقوع ریسک اختلال مانند اختلال در تسهیلات را دارا باشد. بنابراین این شبکه‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که به هنگام وقوع اختلال توانایی فراهم‌آوری محصولات و خدمات به مشتریان را در هر لحظه از زمان داشته باشند. هدف این تحقیق مکان‌یابی تسهیلات و تعیین اندازه هر محموله و مؤثرترین مسیرهای خودرو برای حداقل کردن هزینه کل در ۳ سطح (کارخانه‌ها، مراکز توزیع و مشتریان) تحت وجود ریسک اختلال در سیستم است. از آنجا که مدل ارائه شده سه هدفه است، برای حل آن از روش محدودیت افسیلون در حکم یکی از پرکاربردترین روش‌های حل مدل‌های چندهدفه استفاده شد. برای نشان دادن مطلوبیت الگوریتم ژنتیک نامغلوب ۵ مسئله در سایزهای مختلف از طریق این الگوریتم و محدودیت افسیلون حل شد. جواب‌های پارتو از طریق شاخص‌های ارزیابی کیفیت، فاصله و گوناگونی با یکدیگر مقایسه می‌شوند که این مقایسات در جدول ۴ آمده است. از نتایج به دست آمده می‌توان این گونه نتیجه گرفت که میانگین ارزش کیفیت برای تمام مثال‌ها و اجراها برای روش محدودیت افسیلون برابر ۰.۳۶۸۴ و برای ژنتیک ۰.۶۰۱۶ است. همچنین شاخص فاصله گمز به‌طور میانگین ۰.۳۴۳۲ و شاخص فاصله ژنتیک ۰.۴۵۵۲ است. همین‌طور شاخص گوناگونی گمز ۱ و ژنتیک ۰.۷۲ است. بنابراین جواب‌های الگوریتم ژنتیک نامغلوب و گمز از لحاظ این شاخص‌های ارزیابی تفاوت زیادی با هم ندارند و از آنجایی که حل مدل از طریق نرم‌افزار گمز و محدودیت افسیلون بسیار زمانبر است، الگوریتم پیشنهادی برای استفاده در سایزهای بزرگ کاربرد بیشتری دارد و به اندازه کافی قابل

اعتماد است. تحلیل حساسیت مدل خود بیانگر عملکرد مناسب مدل ارائه شده است. در پایان از آنجا که درستی مدل ارائه شده نشان داده شد، کارایی مدل نیز با مطالعه موردی بررسی شد.

## پی‌نوشت

1. Food Supply Chain Management
2. Perishable
3. Location-Routing
4. Location
5. Vehicle Routing Problem
6. Disruption
7. Equity
8. Epsilon Constraint

## منابع

۱. تبریزی، سیف‌اله؛ قدسی‌پور، سیدحسن؛ احمدی، عباس. (۱۳۹۶). ارائه یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی از زنجیره تأمین مواد غذایی فاسدشدنی: مطالعه موردی بر روی زنجیره عرضه ماهیان پرورشی گرم آبی درایران. پژوهش‌نامه بازرگانی، دوره ۲۱ (شماره ۸۴)، ۱۶۹-۲۰۴.
۲. کلانتر نیستانی، حوریه؛ مظفری، مرضیه. (۱۳۹۶). توسعه شبکه لجستیک پیشرو و معکوس در خدمات درمانی در شرایط عدم قطعیت و بحران. دوفصلنامه علمی و پژوهشی مدیریت بحران، دوره ۶ (شماره ۱)، ۵-۱۷.
۳. صادقی‌مقدم، محمدرضا؛ قاسمیان صاحبی، ایمن؛ حیدری‌دهویی، جلیل. (۱۳۹۶). ارزیابی نیازهای آسیب دیدگان در چرخه عمر چهارروزه حادثه در زنجیره تأمین بشردوستانه. دوفصلنامه علمی و پژوهشی مدیریت بحران، دوره ۶ (شماره ۲)، ۴۵-۵۶.
4. Nahmias, S. (1982). Perishable inventory theory: A review. *Operations Research*. 30(3), 680-708.
5. Goyal, S., Giri, B. (2001). Recent trends in modeling of deteriorating inventory. *European Journal of Operational Research*. 134(1), 1-16.
6. Hwang, H.S. (1999). A food distribution model for famine relief. *Computers & Industrial Engineering*. 37(1), 335-338.
7. Chen, H. K., Hsueh, C. F., Chang, M. S. (2009). Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products. *Computers & Operations Research*. 36, 2311-2319.
8. Rong, A., Akkerman, R., Grunow, M. (2011). An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain. *International Journal of Production Economics*. 131, 421-429.
9. Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., Devika, K. (2014). Two-echelon multiple- vehicle location-



22. Crainic, T.G., Perboli, G., Mancini, S., Tadei, R. (2010). Two-echelon vehicle routing problem: A satellite location analysis. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 5944–5955.
23. Shankar, B.I., Shankar, L. Basavarajappa, S., Chen, J.C.H., Kadavevaramath R.S. (2013). Location and allocation decisions for multi-echelon supply chain network – A multi-objective evolutionary approach. *Expert Systems with Applications*. 40, 551–562.
24. Ahmadi-Javid, A., Azad, N. (2010). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation Research - Part E: Logistics and Transportation*. 46, 582–597.
25. Nekooghadi, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Ghezavati, V.R., Javanmard, S. (2014). Solving a new bi-objective location-routing-inventory problem in a distribution network by meta-heuristics. *Computers & Industrial Engineering*. 76, 204–221.
26. Drezner, Z. (1987). Heuristic solution methods for two location problems with unreliable facilities. *Journal of the Operational Research Society*, 38(6), 509–514.
27. Snyder, L.V., Daskin, M.S., 2006. Stochastic p-robust location problems. *IIE Trans*. 38(11), 971–985.
28. Ahmadi-Javid, A., Seddighi, A.H. (2013). A location-routing problem with disruption risk. *Transportation Research Part E*. 53, 63–82.
29. Zhang, Z., Mingyao, Q., Lin, W.H., Miao, L. (2015). A metaheuristic approach to the reliable location routing problem under disruptions. *Transportation Research - Part E: Logistics and Transportation*. 83, 90–110.
30. Hatefi, S.M., Jolai, F., Torabi, S.A., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2015). A credibility-constrained programming for reliable forward-reverse logistics network design under uncertainty and facility disruptions. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 28, 664–678.
31. Shishebori, D., (2016). Reliable multi-product multi-vehicle multi-type link logistics network design: A hybrid heuristic algorithm: A hybrid heuristic algorithm. *Journal of Industrial and Systems Engineering*. 9, 92–108.
۳۲. کلانترنیستانی، حوریه؛ مظفری، مرضیه. (۱۳۹۶). طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار برای خدمات پزشکی در شرایط عدم قطعیت. *نشریه علمی مدیریت زنجیره تامین*، دوره ۲۰ (شماره ۵۹)، ۲۸–۱۸.
33. Azad, N., G. K. D. Saharidis, H. Davoudpour, H. Malekly, and S. A. Yektamaram. (2013). Strategies for Protecting supply chain networks against facility and transportation disruptions: An improved benders decomposition approach. *Annals of Operations Research*. 210, 125–163.
34. Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Rahimi, Y., Jolai, F. (2016). An interactive possibilistic programming approach for a multi-objective hub location problem: Economic and environmental design. *Applied Soft Computing*. 699–713
35. Tavakkoli-Moghaddam, R., Razi, Z. (2016). A new routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *Production Economics*. 152, 9–28.
10. Khalili-Damghani, K., Abtahi, A.R., Ghasemi, A. (2015). A new bi-objective location-routing problem for distribution of perishable products: Evolutionary computation approach. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research*. 14, 287–312.
11. Tavakkoli-Moghaddam, R., Otrodi, F. (2014). Vehicle routing problem with time-windows and weighted nodes for perishable food delivery. *Proceeding of the 2<sup>nd</sup> National Conference on Industrial Engineering & Systems*. 25–26.
۱۲. کلانتری، محدثه؛ پیشوایی، میرسامان. (۱۳۹۵). یک مدل برنامه ریزی استوار امکانی برای برنامه ریزی اصلی زنجیره تامین دارو. *نشریه پژوهش های مهندسی صنایع در سیستم های تولید*، دوره ۴ (شماره ۷)، ۶۷–۴۹.
۱۳. کاظمی، سید محمود؛ ربانی، مسعود. (۱۳۹۵). روش شاخه و برگ برای مسئله موجودی-مسیریابی واحدهای خون: یک مطالعه موردی. *نشریه علمی مدیریت زنجیره تامین*، دوره ۱۸ (شماره ۵۱)، ۷۰–۶۲.
14. Qiu, Y., Qiao, J., Pardalos, P.M. (2019). Optimal production, replenishment, delivery, routing and inventory management policies for products with perishable inventory. *Omega*. 82, 193–204.
15. de Keizer, M., Akkerman, R., Grunow, M., Bloemhof, J.M., Haijema, R., van der Vorst, J.G.A.J., (2019). Logistics network design for perishable products with heterogeneous quality decay. *European Journal of Operational Research*. 262(2), 535–549.
16. Janssen, L., Diabat, A., Sauer, J., Herrmann, F. (2018). A stochastic micro-periodic age-based inventory replenishment policy for perishable goods. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 118, 445–465.
17. Janssen, L., Sauer, J., Claus, T.U. (2018). Nehls Development and simulation analysis of a new perishable inventory model with a closing days constraint under non-stationary stochastic demand. *Computers & Industrial Engineering*. 118, 9–22.
18. Zhang, Y., Zhao, L., Qian, C. (2017). Modeling of an IoT-enabled supply chain for perishable food with two-echelon supply hubs. *Industrial Management & Data Systems*. 117(9), 1890–1905.
19. Aliyu, I., Sani, B. (2018). An inventory model for deteriorating items with generalised exponential decreasing demand, constant holding cost and time-varying deterioration rate. *American Journal of Operations Research*. 08(1), 1–16.
20. Lin, L., Gen, M., Wang, X., 2009. Integrated multi-stage logistics network design by using hybrid evolutionary algorithm. *Computers and Industrial Engineering*. 56, 854–873.
21. Crainic, T.G., Mancini, S., Perboli, G., Tadei, R. (2012). Impact of generalized travel costs on satellite location in the two-echelon vehicle routing problem. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. 39, 195–204

bi-objective location-routing-inventory problem with fuzzy demands. IFAC-PapersOnLine. 49(12), 1116-1121.

۳۶. ارکات، جمال؛ زمانی، شکوفه؛ قدس، پرک. (۱۳۹۴). مکان‌یابی و مسیریابی تسهیلات اورژانسی با فرض احتمال خرابی مسیرهای ارتباطی در زمان بحران. دوفصلنامه علمی و پژوهشی مدیریت بحران، دوره ۴ (شماره ۲)، ۹۵-۱۰۶.

۳۷. جمالی، حسین؛ بشیری، مهدی؛ توکلی مقدم، رضا. (۴۹۳۱). بررسی و حل مسئله امدادرسانی دوسطحی نقاط آسیب دیده از بحران. دوفصلنامه علمی و پژوهشی مدیریت بحران، دوره ۴ (شماره ۲)، ۲۲-۵.

۴۶

شماره نوزدهم

بهار و تابستان

۱۴۰۰

دوفصلنامه

پژوهشی



مدل سازی ریاضی برای مسئله مکان‌یابی-مسیریابی دو سطحی در زنجیره تامین مواد غذایی فساد پذیر با ریسک اختلال