Archive of SID

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

ندا مشهدی: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
رضا توکلی‌مقدم*: 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 سه‌هدفه 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 اپسیلون در نرم‌افزار گمز بررسی می‌شود. از آنجا که این مسئله جز و 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 ارائه‌شده، 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[1], Reza Tavakkoli-Moghaddam[2*]

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 ε-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 ۱۰ zone of district ۱ 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

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

زنجیره تأمین به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین مباحث در دستگاه‌های تولید و توزیع شناخته می‌شود. به دلیل افزایش رقابت در جهان، شرکت‌ها برای فراهم‌آوری کالاها با قیمت و کیفیت مناسب و در زمان تحویل کمتر برای مشتریان خود به استفاده از شبکه‌های زنجیره تأمین و لجستیک روی آورده‌اند. هدف فعالیت‌های زنجیره تأمین شناسایی تقاضای مشتریان، بهبود قابلیت پاسخ‌دهی به مشتریان، کنترل تولید یا فرآیندهای خدمت‌رسانی و همسویی اهداف شرکای زنجیره تأمین است. مدیریت زنجیره تأمین غذایی[1] به دلیل مقیاس بالایش در صنعت، مقدار اتلاف مواد غذایی در جهان و رابطه بین اتلاف مواد غذایی و سوءتغذیه جهانی از اهمیت بالایی برخوردار است. زنجیره تأمین مواد غذایی شامل تهیه و تولید غذا و شرکت‌های تولیدکننده، عمده‌فروشی و کارخانه‌های توزیع، دلالان، مکان‌های سرویس غذا و رستوران‌هاست. همچنین از آنجایی که اقلام فسادپذیر[2] به‌عنوان کالایی پرکاربرد در صنعت شناخته می‌شود، جایگاه ویژه‌ای در پژوهش‌های انجام‌شده دارند. از این‌رو بررسی اقلام فسادپذیر در قالب زنجیره تأمین می‌تواند نیازهای بخشی از صنایع که با این اقلام در ارتباط هستند را برطرف کند. زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی دارای ویژگی‌های خاصی ازقبیل عمر کوتاه، شرایط نگهداری خاص، تجهیزات وتسهیلات ویژه جهت نگهداری، تولید، توزیع است. بر اساس مدیریت زنجیره تأمین مواد غذایی، این نوع مواد باید قبل از فاسدشدن به فروش رفته و همین‌طور حداکثر سود حاصل شود. برخلاف اهمیت زیاد غذا در صنعت در زمینه زنجیره تأمین غذایی تحقیقات گسترده‌ای صورت نگرفته و دلیل آن پیچیدگی شبکه مدیریت تأمین غذایی و وجود محصولات خاص و شاخصه‌های پردازش گوناگون است. همچنین کلیه زنجیره‌های تأمین با چالش‌های ریسک اختلال و بحران روبرو هستند. در واقع اثر بلندمدت اختلال روی زنجیره تأمین اثر گذاشته و موجب بحران در آن می‌شود.

پیشینه پژوهش

با درنظرگرفتن طیف وسیع تصمیم‌گیری زنجیره تأمین غذایی هیچ مدلی قادر به درنظرگرفتن تمام بعدهای مسئله نیست. تحقیقات مربوط به محصولات غذایی، اکثراً فسادپذیری محصولات را در نظر گرفته‌اند. مدیریت زنجیره تأمین اقلام فسادپذیر طیف وسیعی از زنجیره عرضه ماهیان پرورشی گرم آبی [۱] تا خدمات درمانی [۲] و زنجیره تأمین بشردوستانه [۳] می‌شود.

نهمیاس [۴]، گویال و گری [۵]، مطالعات وسیعی را در زمینه سیستم‌های موجودی و محصولات با درنظرگرفتن 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. زمان‌بندی محصولات و مسیریابی وسایل حمل‌ونقل 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] به‌وسیله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مدیریت زنجیره تأمین محصولات غذایی تازه از قبیل سبزیجات با تأکید بر سیستم‌های توزیع بر پایه کیفیت پرداختند. گوییندان و همکاران [۹] یک مسئله دو سطحی مکان‌یابی-مسیریابی با پنجره زمانی را برای یک زنجیره تأمین پایدار مواد غذایی ارائه کردند. خلیلی و همکاران [۱۰] یک مدل دوهدفه برای محصولات فاسدپذیر ارائه کردند و با الگوریتم فرابتکاری به حل آن پرداختند. توکلی‌مقدم و اطرودی [۱۱] هم کار چن و همکاران [۷] را گسترش داده و با درنظرگرفتن گره‌های وزن‌دار در شبکه زنجیره تأمین مواد غذایی فاسدشدنی به ارائه یک مدل پرداختند. کلانتری و پیشوایی [۱۲]، یک مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار برای زنجیره تأمین دارو ارائه کردند و با یک مطالعه موردی کیفیت بالای عملکرد برنامه‌ریزی 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 داده‌اند. هدف مدل ارائه‌شده آن‌ها پاسخ به این پرسش اساسی است که چه زمان و به چه مقدار محصولات را با توجه به تغییرپذیری زمان‌های 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 هزینه‌هاست. طراحی شبکه زنجیره تأمین موضوع مهمی در برنامه‌ریزی برای محصولات فسادپذیر است که کایزر و همکاران [۱۵] به آن پرداخته‌اند. در واقع طراحی متفاوت شبکه زنجیره تأمین سبب تفاوت در زمان و شرایطی در حمل‌ونقل، انبارداری و فرآیند تهیه و تولید خواهد شد؛ بنابراین اهمیت سفارش به موقع محصولات ضمن حفظ کیفیت آن‌ها به‌ویژه برای مواد غذایی اهمیت پیدا می‌کند. به همین منظور یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هدف بیشینه‌سازی سود ارائه شده است.

جانسن و همکاران [۱۶] یک سیاست سفارش‌دهی موجودی بر اساس زمان‌های متفاوت در روز (صبح، ظهر، بعدازظهر و شب) با درنظرگرفتن عمر مفید و زمان سفارش محصولات به‌صورت قطعی، تقاضای احتمالی و سیاست سفارش‌دهی همزمان FIFO و LIFO ، برای ارائه یک مدل موجودی برای اقلام فسادپذیر پیشنهاد داده‌اند. نتایج این مدل نشان می‌دهد هزینه‌های سیستم موجودی تا ۶۶٪ نسبت به زمانی که مدل کنترل موجودی بر اساس کل ساعات یک روز برنامه‌ریزی می‌شود، کاهش می‌یابد. جانسن و همکاران [۱۷]در ادامه توسعه مدل قبل محدودیت زمان‌های تعطیل (که باعث افزایش عمر محصولات فسادپذیر می‌شود) و تقاضای پویای احتمالی را به مسئله اضافه کرده‌اند و نشان داده‌اند با اضافه کردن این محدودیت تصمیمات مربوط به سفارش‌دهی بهبود می‌یابد و همچنین اتلاف محصولات کاهش

www.SID.ir

Archive of SID

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 اشیاء است. آن‌ها از این‌روش برای جمع‌آوری اطلاعات تقاضا به‌عنوان پارامتر ورودی مدل دوسطحی زنجیره تأمین بیان‌شده استفاده می‌کنند. در اکثر مدل‌های بررسی‌شده 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 درنظرگرفتن نرخ فساد وابسته به زمان و تقاضای نمایی برای ارائه کرده‌اند.

مسائل مکان‌یابی-مسیریابی [۳] از مسائل مهم در لجستیک است که شامل مکان‌یابی[۴] و مسیریابی خودرو[۵] است. مطالعات اخیر در زمینه مکان‌یابی-مسیریابی دوسطحی تمرکز کردند که بهینه‌سازی آن ازجمله مسائل بسیار سختی است. اولین کار بر روی 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 حل‌شده 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 درزنر [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 تولید کننده-توزیع کننده 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 درنظرگرفتن اختلال در تسهیلات و جاده‌های ارتباطی وسیله نقلیه ارائه داد. کلانتر نیستانکی 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 درنظرگرفتن 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. توکلی‌مقدم 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 به‌صورت 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

www.SID.ir

Archive of SID

کالاها از کارخانه به مشتریان به‌واسطه انبارهای میانی (مراکز توزیع) است. شبکه زنجیره تأمین طراحی‌شده باید قابلیت پاسخ‌دهی به نیازهای مشتریان را هنگام وقوع ریسک‌اختلال، مانند اختلال در تسهیلات یا اختلال در مسیر را دارا باشد. بنابراین این شبکه‌ها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که به هنگام وقوع اختلال توانایی فراهم‌آوری محصولات وخدمات به مشتریان را در هر لحظه از زمان داشته باشند. این احتمال با توجه به عواملی مانند شرایط جغرافیایی و یا نوع زیرسازی‌ها و مصالح به‌کاررفته در ساخت کمان مشخص می‌شود. مدل ریاضی ارائه‌شده ضمن تعیین مکان استقرار تسهیلات، 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 شود. هدف این تحقیق مکان‌یابی تسهیلات و تعیین اندازه هر محموله و مؤثرترین مسیرهای خودرو برای به حداقل رساندن هزینه کل در ۳ سطح کارخانه‌ها، مراکز توزیع و مشتریان تحت وجود ریسک اختلال در سیستم است.

شرح مسئله

دنیای رقابتی امروز شرکت‌ها را بر آن می‌دارد تا تصمیمات استراتژیکی و عملی جهت بهینه‌سازی و مدیریت سودمند پردازش دستگاه‌های لجستیک خود اتخاذ کنند. مسئله مکان‌یابی-مسیریابی وسیله نقلیه از مسائل مهم در لجستیک است و با توجه به نوع تسهیلات و محصولات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این موضوع در مورد محصولات شدیداً فاسدشدنی اهمیت دوچندانی پیدامی‌کند. مسئله مکان‌یابی-مسیریابی متشکل از دو مسئله مکان‌یابی انبار و مسیریابی وسایل نقلیه است که در مدل ریاضی مکان‌یابی-مسیریابی این دو مسئله را همزمان در نظر گرفته و مسئله را حل می‌کنند. با استفاده از سیستم‌های حمل‌ونقل مشتری‌محور می‌توان بازارهای فعال کنونی را گسترش داد و نیز بازارهای تازه ایجاد کرد، محصولات فاسدشدنی را در حداقل زمان به مصرف‌کنندگان برساند و با حداقل رساندن زمان تحویل کالا رضایت مشتریان افزایش یابدکه همین امر سبب به تسخیر درآوردن بازار کالا مربوطه می‌شود.

زنجیره‌های تأمین به ویژه زنجیره‌های تأمین جهانی در معرض طیف وسیعی از ریسک‌ها قرار دارند که این ریسک‌ها عملکرد تأمین‌کننده‌ها و کل زنجیره تأمین را درمعرض خطر قرار می‌دهند. به‌طور مثال بلایای طبیعی، اعتصابات و اقدامات تروریستی ازجمله این ریسک‌هاست. در نتیجه شرکت‌ها می‌بایست استراتژی‌های مدیریتی خود را برای پاسخ‌دهی سریع به حوادث غیرمنتظره در زنجیره تأمین حذف و یا کاهش اثرات نامطلوب حوادث غیرمنتظره بهبود دهند. در بیشتر مدل‌های مکان‌یابی یا مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین فرض بر این است که تسهیلات تولیدی یا توزیعی همواره سالم و در دسترس هستند؛ اما هنگامی‌که تسهیلات دچار اختلال می‌شوند، ساختار مدلی به‌کلی تغییر می‌کند و مدل‌های کنونی دراین شرایط کارا نیستند. بنابراین این مدل‌ها باید به‌گونه‌ای طراحی شوندکه در شرایط وجود ریسک‌های اختلال نیز کارا باشند. ریسک اختلال هنگامی اتفاق می‌افتد که ساختار سیستم زنجیره تأمین دچار تغییر اساسی شود و دلیل آن در دسترس نبودن تسهیلات توزیع، انبار، تولید و یا اختلال[۶] موجود درحمل‌ونقل ناشی از وقایع غیرمنتظره طبیعی یا بشری است. اختلال یک تأمین‌کننده یا یک زیرسامانه باعث کمبود عرضه و یا در بدترین حالت باعث اختلال کل زنجیره می‌شود. در چنین محیط عرضه‌کننده ممکن است پیامدهای نامطلوبی بر موفقیت همه شرکت‌های موجود در زنجیره تأمین داشته باشد. هزینه‌های ازدست‌رفته کاهش سهم بازار و جریمه‌های قراردادهای بسته‌شده همگی ازپیامدهای ممکن اختلال‌ها در زنجیره تأمین است.

در این تحقیق مسئله مکان‌یابی-مسیریابی دوسطحی انتقال کالاها از کارخانه به مشتریان به‌واسطه انبارهای میانی (مراکز توزیع) صورت می‌گیرد. در سطح اول به اتخاذ تصمیمات مربوط به انتخاب تسهیلات فعال از مجموعه کارخانه‌ها و مراکز توزیع بالقوه و در سطح دوم تصمیمات مربوط به تعیین مقدار محصولات تحویل‌داده‌شده به مشتریان از مراکز توزیع و متعاقباً به مراکز توزیع از کارخانه‌ها و همچنین مسیریابی وسیله نقلیه می‌پردازیم. شبکه زنجیره تأمین طراحی‌شده باید قابلیت پاسخ‌دهی به نیازهای مشتریان را هنگام وقوع ریسک اختلال مانند اختلال در تسهیلات را دارا باشد. بنابراین این شبکه‌ها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که به‌هنگام 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.

مدل‌سازی ریاضی

مفروضات مدل ریاضی:

- مکان‌های نامزدشده برای مراکز توزیع بالقوه از پیش تعیین شده و به‌طور 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 خدمت‌رسانی می‌کنند. بنابراین فرض شده که هر وسیله نقلیه تنها به یک نقطه تقاضا در هر دوره زمانی خدمت‌رسانی می‌کند و هر نقطه تقاضا می‌تواند توسط وسایل نقلیه متفاوتی خدمت دریافت کند.
- مراکز توزیع در سناریوهای مختلف دچار اختلال می‌شوند.
- هر مسیر ممکن است بعد از وقوع اختلال به‌صورت جزئی آسیب ببیند و میزانی قابلیت اطمینان بر اساس درصد خرابی‌اش دارد. قابلیت اطمینان به‌عنوان شاخصی برای

www.SID.ir

Archive of SID

حداکثرسازی امنیت رانندگان و میزان بار رسانده‌شده به نقاط تقاضا در نظر گرفته می‌شود.

- تعدادی گروه تعمیرات مجهز به بولدوزر، حفارگر، کامیون و دیگر تجهیزات به‌منظور بازیابی هر چه سریع‌تر 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 می‌شود.
- کلیه اطلاعات موردنیاز در هر سناریو احتمالی (شامل مواردی نظیر تقاضای کالا، زمان‌های حمل‌ونقل و درصد خرابی مسیرها) در دسترس هستند.

اندیس‌ها و مجموعه‌ها:

I: اندیس مجموعه مراکز توزیع بالقوه ($i=1,...,I$)

J: اندیس مجموعه مشتریان ($j=1,...,J$)

P_{ij}: مجموعه مسیرهای بین نقاط i و J$(i\in I, j\in J)$

U: اندیس مجموعه مکان‌های بالقوه نامزدشده برای احداث کارخانه (u=1,…,U)

V: اندیس مجموعه وسایل نقلیه ($v=1,...,V$)

K: اندیس مجموعه کالاها ($k=1,...,K$)

T: اندیس دوره‌های زمانی ($t=1,...,T$)

S: اندیس مجموعه سناریو ($s=1,...,S$)

پارامترها:

qi: احتمال خرابی پایگاه i

Ps: احتمال رویداد سناریو s، ($\sum_s p_s=1$) و $p_s=\prod_i q_i.\prod_i(1-q_i)$

wts: هزینه هر تیم تعمیر در دوره t تحت سناریو s

Ci: هزینه بازگشایی مراکز توزیع بالقوه i

Su: هزینه بازگشایی کارخانه u

CT_{ij}: هزینه جابه‌جایی خودرو در سطح اول (از u به i)

CC_{ij}: هزینه جابه‌جایی خودرو در سطح دوم (از i به j)

d_{jkts}: تقاضای مشتری j برای کالای k در دوره t تحت سناریو s

t_{ijkvs}: 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^p_{ijs}: درصد خرابی مسیر p بین نقاط i و j تحت سناریو s

e^p_{ijs}: تعداد دوره‌های زمانی موردنیاز برای تعمیر مسیر p بین مرکز توزیع i و مشتری j تحت سناریو s

τ_{jks}: جریمه هر کالای ارضانشده k برای مشتری j تحت سناریو s

F: حداکثر تعداد مراکز توزیع بالقوه

Vi: تعداد وسیله نقلیه در مرکز توزیع بالقوه

b_k: واحد حجم کالای

Q_v: ظرفیت هر وسیله نقلیه v برای جابه‌جایی کالای از مراکز به نقاط تقاضا

ψ_{ik}: میزان در دسترس کالا k در مرکز توزیع بالقوه i

G: تعداد تیم‌های 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 این‌صورت

M_{is}: یک، اگر مرکز توزیع بالقوه i در سناریوی s تأسیس شود؛ صفر، در غیر این‌صورت

Ma_{us}: یک، اگر کارخانه u در سناریوی s تأسیس شود؛ صفر، در غیر این‌صورت

z_{iks}: یک، اگر مشتری k تحت پوشش پایگاه i در سناریو s قرار بگیرد؛ صفر، در غیر این‌صورت

y^p_{ijts}: 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 این‌صورت

x^p_{ijvts}: 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 این‌صورت

n^p_{iuts}: 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 این‌صورت

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.s.

r^p_{ijts}: قابلیت اطمینان مسیر p بین نقاط i و j در دوره t تحت سناریو s.

μ_{jks}: مقدار کمبود کالای k در نقطه تقاضای j تحت سناریو s.

مدل ریاضی مسئله:

$$\begin{aligned}\text{Min } & \sum_{s=1}^{S} p_s \Big(\sum_{i=1}^{I} C_i M_{is} + \sum_{u=1}^{U} S_u Ma_{us} \\ & + \sum_{u=1,i=1}^{U,I}\sum_{p=1,v=1,t=1}^{P,V,T} n^p_{uivts} CT_{ui} + \sum_{i=1,j=1}^{I,J}\sum_{p=1,v=1,t=1}^{P,V,T} x^p_{ijvts} CC_{ij} \\ & + \sum_{i=1,j=1}^{I,J}\sum_{t=1,k=1}^{K} \tau_{jks}\mu_{jkts}a_{is} + \sum_{i=1,j=1}^{I,J}\sum_{p=1,t=1}^{P,T} w_{ts} e^p_{ijs} y^p_{ijts}\Big)\end{aligned} \quad (1)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$\text{Min} \sum_{s=1}^{S} p_s \left(\sum_{j=1}^{J} \left[\frac{\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\sum_{v=1}^{V}\sum_{t=1}^{T} t_{ijkvs} q_{ijkvts} + b_{uikvs} \cdot p_{uikvts}}{\sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} d_{jkts}} \right] \right) \quad (۲)$$

$$\text{Max} \quad \sum_{s=1}^{S} p_s \left(\sum_{v=1}^{V}\sum_{t=1}^{T} \min_{(i,j,p)} 2.r^{p}_{ijts} x^{p}_{ijvts} \right) \quad (۳)$$

s.t.

$$r^{p}_{ijts} = 1 - h^{p}_{ijs} \left(1 - \sum_{t'=1}^{t-e^{p}_{ijs}} y^{p}_{ijt's}\right) \qquad \forall i,j,p,t,s \quad (۴)$$

$$x^{p}_{ijvts} \le 1 - \sum_{t'=t-e^{p}_{ijs}+1}^{t} y^{p}_{ijt's} \qquad \forall i,j,p,k,t,s \quad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P} y^{p}_{ijts} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t'=\min\left(t-e^{p}_{ij}+1,1\right)}^{t-1} y^{p}_{ijt's} \le G.(1-a_{is}) \qquad \forall t,s \quad (۶)$$

$$x^{p}_{ijvts} \le M_{is}.(1-a_{is}) \qquad \forall i,j,p,v,t,s \quad (۷)$$

$$n^{p}iuts \le Ma_{us} \qquad \forall i,p,u,t,s \quad (۸)$$

$$\sum_{i \in I} M_{is} \le F \qquad \forall s \quad (۹)$$

$$\sum_{i \in I}\sum_{j \in J}\sum_{p \in P_{ij}}\sum_{k \in K} b_k d_{jkts} x^{p}_{ijvts} \le Q_v \qquad \forall v,t,s \quad (۱۰)$$

$$\mu_{jkts} + \sum_{i \in I}\sum_{v \in V'} q_{ijkvts} = d_{jkts} \qquad \forall j,k,t,s \quad (۱۱)$$

$$\sum_{p \in P_{ij}} x^{p}_{ijts} \le 1 \qquad \forall i,j,t,s \quad (۱۲)$$

$$x^{p}_{ijvts} \le x^{p}_{ijts} \qquad \forall i,j,p,v,t,s \quad (۱۳)$$

$$n^{p}_{uivts} \le n^{p}_{uits} \qquad \forall i,u,p,v,t,s \quad (۱۴)$$

$$\sum_{i \in I}\sum_{j \in J}\sum_{p \in P_{ij}} x^{p}_{ijvts} \le 1 \qquad \forall v,t,s \quad (۱۵)$$

$$\sum_{j \in J}\sum_{p \in P_{ij}}\sum_{v \in V'} x^{p}_{ijvts} \le V_i \qquad \forall i,t,s \quad (۱۶)$$

$$q_{ijkvts} \le M \sum_{p \in P_{ij}} x^{p}_{ijvts} \qquad \forall i,j,k,v,t,s \quad (۱۷)$$

$$\sum_{j}\sum_{v}\sum_{t} q_{ijkvts} \le \psi_{ik} \qquad \forall i,k,s \quad (۱۸)$$

$$2t^{p}_{ijkvs} x^{p}_{ijvts} \le H \qquad \forall i,j,p,v,t,s \quad (۱۹)$$

$$n^{p}_{iuts} \le M_{is}.(1-a_{is}) \qquad \forall i,p,u,t,s \quad (۲۰)$$

$$a_{is} \le M_{is} \qquad \forall i,s \quad (۲۱)$$

$$r^{p}_{ijts}, q'_{ikts}, q_{ijkvts}, p_{uikvts} \ge 0 \qquad \forall i,j,p,k,v,t,s \quad (۲۲)$$

$$M_{is}, Ma_{us}, x^{p}_{ijvts}, x^{p}_{ijts}, y^{p}_{ijts} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j,p,v,t,s \quad (۲۲)$$

تابع هدف (۱) به‌منظور کمینه‌سازی هزینه‌های کلی شامل هزینه مکان‌یابی مراکز موقت، هزینه مکان‌یابی کارخانه‌ها، مسیریابی خودرو در سطح اول از کارخانه به مراکز توزیع، مسیریابی در سطح دوم از مراکز توزیع به مشتریان، هزینه جریمه کلی تقاضای برآورده‌نشده و هزینه تعمیر مسیرها ایجاد شده است. هزینه تقاضای برآورده‌نشده 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 می‌گیرد. تابع هدف (۲) متوسط زمان پاسخ وزن‌دار را برای کل سناریوهای ممکن حداقل می‌سازد. وزن‌ها مربوط به نسبت ارضای تقاضا به وسیله مراکز و کارخانه است. زمان واکنش عبارت است از زمان لازم برای حمل‌ونقل بین مرکز و نقطه تقاضا. این تابع هدف برای این منظور در نظرگرفته شده است تا مراکزی برای سرویس‌دهی 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 می‌کند.

محدودیت‌های (۴) تا (۶) محدودیت‌های 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 می‌کند. همچنین محدودیت (۵) تضمین می‌کند که مسیرها در طول بازه بازیابی نباید مورد استفاده قرار گیرند و محدودیت (۶) تعداد مسیرهای آسیب دیده‌ای که تعمیر می‌شوند را به تعداد تیم تعمیرات در دسترس محدود می‌کند.

محدودیت (۷) تضمین می‌کند که تنها مراکز موقت باز شده قابلیت خدمت‌رسانی به نقاط تقاضا را دارا هستند. محدودیت (۸) تضمین می‌کند که تنها کارخانه‌های باز شده قابلیت خدمت‌رسانی به نقاط مراکز را دارا هستند. محدودیت (۹) نیز نشان می‌دهد که تعداد مراکز باز شده نباید از تعداد مجاز پیشی گیرد. محدودیت (۱۰) محدودیت ظرفیت وسائل نقلیه است و نشان می‌دهد 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 برآورده‌نشده برای هر نقطه تقاضا را محدود می‌کند. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که حداکثر یک مسیر بین مرکز موقت و نقطه تقاضا برای توزیع کالا در هر دوره زمانی باید استفاده شود و محدودیت (۱۳) نشان‌دهنده این است که عبورومرور وسائل نقلیه مابین مرکز موقت و نقطه تقاضا در هر دوره زمانی باید از یک مسیر صورت گیرد. محدودیت (۱۴) نشان‌دهنده این است که عبورومرور وسائل نقلیه مابین کارخانه و مرکز موقت در هر دوره زمانی باید از یک مسیر صورت گیرد. محدودیت (۱۵) نشان می‌دهد که هر وسیله نقلیه حداکثر یک‌بار در هر دوره زمانی می‌تواند خدمت‌رسانی کند. محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند که تعداد وسائل نقلیه به‌کارگرفته‌شده در هر دوره زمانی از تعداد وسائل نقلیه در دسترس در مرکز بیشتر نیست. رابطه منطقی بین کالاهای تحویل‌داده‌شده به هر نقطه تقاضا و متغیرهای دودویی نظیرش در محدودیت (۱۷) نشان داده شده است و محدودیت (۱۸)

www.SID.ir

Archive of SID

محدودیت ظرفیت مراکز است؛ بدین معنا که کل کالای برده‌شده 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 تخصیص‌داده‌شده 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 به‌صورت زیر محاسبه کند:

$$q'_{ikts} = \sum_{j\in J}\sum_{v\in V} q_{ijkvts} \qquad \forall i,\mathrm{k},t,s \qquad (۲۴)$$

برابری[۷]

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در بیشتر موارد در شرایط اضطراری با مقیاس بزرگ میزان کالای در دسترس به‌منظور برآورده کردن تمامی تقاضاها کافی نیستند. از این‌رو برابری و عدالت یکی از مفاهیم مهمی است که اخیراً در ادبیات موضوع در نظر گرفته شده است. در این تحقیق برابری با درنظرگرفتن نرخ پرسازی برای همه نقاط تقاضا ارضا می‌شود. در این‌جا فرض شده که D_{kt} و d'_{jkt} به‌ترتیب نشان‌دهنده مقدار در دسترس کالای k در دوره زمانی t و مقدار تحویل‌داده‌شده 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}) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Fr_{jkt} = \frac{d'_{jkt}}{D_{kt}} \qquad (۲۵)$$

همچنین می‌توان معادلات (۲۶) و (۲۷) را براساس تساوی نرخ پرسازی و این واقعیت که مجموع کالاهای تحویل‌داده‌شده باید با کالای در دسترس در هر دوره برابر باشد، به‌صورت زیر بیان کرد:

$$Fr_{jkt} = Fr_{j'kt} \qquad \forall j,j' \in J,\mathrm{k},t \qquad (۲۶)$$

$$\sum_{j\in J} d'_{jkt} = D_{kt} \qquad \forall k,t \qquad (۲۷)$$

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

$$d'_{jst} = \frac{d_{jkt}}{\sum_{j\in J} d_{jkt}} D_{kt} \qquad \forall j,\mathrm{k},t \qquad (۲۸)$$

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

خطی‌سازی

در این مرحله تابع هدف غیرخطی Max min را می‌توان با یک روش ساده خطی کرد:

$$\mathrm{Max} \sum_{s\in S} p_s \sum_{v\in V}\sum_{t\in T} \alpha_{vts}$$

$$r^{p}_{ijts} x^{p}_{ijvts} \geq \alpha_{vts} \qquad \forall i,j,p,v,t \qquad (۲۹)$$

$$\alpha_{vts} \geq 0$$

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. به‌منظور 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 به‌منظور حل مثال‌های واقعی طراحی نشده، بلکه هدف اعتبارسنجی مدل است. در بخش بعدی مدل با روش دقیق و بااستفاده 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 ارائه‌شده وجود با مفروضات موجود ارائه‌نشده، مقادیر تعدادی از پارامترهای مدل به‌صورت فرضی و تجزیه و تحلیل از عملکرد مدل ارائه شده است.

روش محدودیت اپسیلون[۸]

یکی از روش‌های دقیق به‌دست آوردن حل‌های پارتوی بهینه استفاده از روش محدودیت اپسیلون است که اولین بار توسط آلجدان 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 به‌کارگیری الگوریتم فراابتکاری موجب کاهش شدید زمان محاسباتی خواهد شد.

برای اعتبارسنجی مدل ریاضی ارائه‌شده 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

www.SID.ir

Archive of SID

مکان‌یابی-مسیریابی) جز کلاس NP- hard است. بنابراین با تغییر تعداد محدودیت‌ها زمان حل به‌صورت نمایی رشد می‌کند، نرم‌افزار GAMS در ابعاد بالا قابلیت حل خود را از دست می‌دهد. به همین منظور برای حل مدل در ابعاد بزرگ از روش حل فراابتکاری استفاده خواهد شد. در این تحقیق برای حل مدل سه‌هدفه از الگوریتم فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) استفاده شده است. در ادامه جزئیات مربوط به الگوریتم آورده شده است.

الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

نمایش جواب شدنی

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

[۰ ۱ ۰ ۱ ۰ ۱ ۱ ۰]

تعداد اعضای این آرایه برابر است با تعداد مراکز توزیع بالقوه که از ۱ تا ۸ شماره‌گذاری شده‌اند. نقاط تقاضا هم از ۹ تا ۱۶ شماره‌گذاری شده‌اند. اعداد این آرایه به‌طور تصادفی در هر تکرار مقدار صفر و یک می‌گیرند. 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 شده‌اند. در ادامه نزدیک‌ترین نقاط تقاضا به این مراکز تخصیص داده می‌شوند. فرض کنید نقاط تقاضای ۹و۱۰ به مرکز توزیع ۲، نقاط ۱۱ و ۱۲ به مرکز ۳ و نقاط ۱۳و۱۴ 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:

۲-۹-۱۰-۲-۳-۱۱-۱۲-۳-۵-۱۳-۱۴-۷-۱۵-۱۶-۷

عملگرتقاطع

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

فرض کنید Parent1 و Parent2 نشان‌دهنده 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 می‌شود. مثلا نحوه قرار گرفتن تازه مراکز توزیع به‌صورت زیر است:

parent1 [۰ ۱ ۰ ۱ ۰ ۱ ۱ ۰]
Parent2 [۰ ۰ ۱ ۰ ۱ ۰ ۱ ۱]
Offspring1 [۰ ۰ ۱ ۰ ۰ ۱ ۱ ۰]
Offspring2 [۰ ۱ ۰ ۱ ۱ ۰ ۱ ۱]

عملگرجهش

بعد از آنکه عملگر تقاطع روی مراکز توزیع اولیه (Parent) صورت گرفت، باید از عملگر جهش بر روی مراکز توزیع تازه تولیدشده (Offspring) استفاده کرد. ابتدا به‌صورت تصادفی از آرایه‌های تازه نمونه‌هایی انتخاب می‌شوند و سپس برای آرایه‌های تازه جای دو مقدار به‌صورت تصادفی با هم جابجا می‌شوند که موجب جهش در فضای پاسخ می‌شود.

Offspring۱ = [۰ ۱ ۱ ۰ ۱ ۰ ۰]

آرایه جهش‌یافته به‌صورت زیر خواهد شد:

MutatedBase = [۰ ۰ ۱ ۰ ۱ ۱ ۰]

عملگرانتخاب

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

پارامترهای اولیه را مشخص کن
جمعیت اولیه را به‌صورت تصادفی تولید کن.
مقدار تابع هدف را برای هر یک از جواب‌ها حساب کن.
برای i=۱ تا تعداد نسل‌ها 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 تازه‌ایجادشده انتخاب کن.
پایان

شاخص‌های ارزیابی الگوریتم

شاخص کیفیت: این شاخص نشان‌دهنده سهم هر الگوریتم در مجموعه جواب‌های پارتو حاصل از ترکیب جواب‌های پارتوی کلیه روش‌هاست. این شاخص هر چه بیشتر باشد، بهتر است.

شاخص فاصله از نقطه ایده‌آل: فرمول ریاضی این شاخص برابر است با:

$$DIM = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\left(\sum_{j=1}^{n}\frac{f_j^i - f_j^{best}}{f_{j,total}^{max} - f_{j,total}^{min}}\right)^2} \qquad (۳۰)$$

که در آن n برابر تعداد نقاط پارتو، j اندیس تابع هدف، $f_{1,total}^{max}$ و $f_{1,total}^{min}$ به‌ترتیب برابر کمترین و بیشترین مقادیر تابع هدف j در تمام روش‌هاست. f_j^{best} و f_j^i نیز به‌ترتیب برابر مقدار ایده آل تابع هدف j ام و مقدار تابع هدف j ام در الگوریتم مورد بررسی هستند. این شاخص هر چه پایین‌تر باشد، بهتر است.

شاخص گوناگونی: این شاخص وسعت جواب‌های پارتو ارائه‌شده توسط یک الگوریتم را می‌سنجد.

$$DM = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^{n}\frac{f_j^{max} - f_j^{min}}{f_{j,total}^{max} - f_{j,total}^{min}}\right)^2} \qquad (۳۱)$$

که در آن j اندیس تابع هدف، $f_{1,total}^{min}$ و $f_{1,total}^{max}$ به‌ترتیب برابر کمترین و بیشترین مقادیر تابع هدف j در تمام روش‌هاست. f_j^{min} و f_j^{max} نیز به‌ترتیب برابر بیشترین و کمترین مقادیر تابع هدف j

www.SID.ir

Archive of SID

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.

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| \overline{d} - d_i \right|}{(n-1)\overline{d}} \quad (۳۲)$$

که در آن di برابر با فاصله اقلیدسی بین دو جواب کناری در فضای حل و $\overline{d}$ 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 تاگوچی 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 اپسیلون استفاده شده که می‌توان با حدف 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 به‌منظور 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

	Npop	It	Pc	Mu
سطح ۱	۵۰	۲۰۰	۰،۶۵	۰،۱۵
سطح ۲	۱۰۰	۳۰۰	۰،۷۵	۰،۲
سطح ۳	۱۵۰	۵۰۰	۰،۸	۰،۲۵

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 نرمال‌شده 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

	جواب	هزینه	متوسط زمان پاسخ	قابلیت اطمینان
ژنتیک	۱	۷۴۳۹۰۵۶	۱۲،۹	۰،۷۸
	۲	۴۰۵۵۹۴۲	۱۸،۱	۰،۵۶
	۳	۴۰۴۶۸۳۶	۱۵،۸	۰،۵۰
	۴	۴۰۴۲۵۱۲	۱۶،۱	۰،۵۹
گمز	۵	۷۴۳۱۸۲۱	۱۱،۴	۰،۷۶
	۶	۵۸۲۹۵۴۶	۱۳،۲	۰،۶۷
	۷	۴۰۴۳۵۳۵	۱۷،۵	۰،۶۲

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵- نتایج مقایسه‌ای شاخص‌های ارزیابی

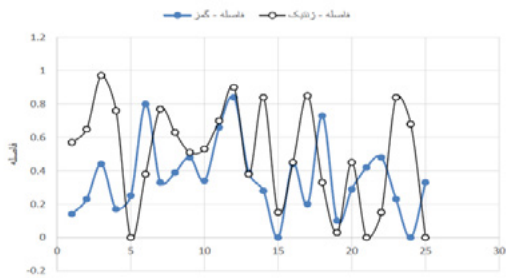
		Gams			NSGA-II		
مسئله	اجرا	کیفیت	فاصله	گوناگونی	کیفیت	فاصله	گوناگونی
۱	۱	۰,۴۱	۰,۱۲	۰,۵۵	۰,۵۶	۰,۵۴	۰,۹۱
	۲	۰,۴۲	۰,۲۲	۰,۸۵	۰,۵۶	۰,۶۴	۰,۹۰
	۳	۰,۵۰	۰,۴۴	۱,۳۶	۰,۵۰	۰,۹۶	۱,۴۹
	۴	۰,۳۸	۰,۱۶	۱,۷۰	۰,۶۰	۰,۷۵	۰,۰۰
	۵	۰,۵۰	۰,۲۶	۰,۶۶	۰,۴۱	۰,۰۰	۰,۰۷
۲	۱	۰,۵۰	۰,۸۰	۰,۸۱	۰,۴۶	۰,۳۶	۰,۸۰
	۲	۰,۴۰	۰,۳۱	۱,۴۱	۰,۵۸	۰,۷۵	۱,۲۸
	۳	۰,۱۹	۰,۳۷	۱,۰۴	۰,۷۸	۰,۶۱	۱,۵۳
	۴	۰,۳۸	۰,۴۵	۱,۱۶	۰,۵۶	۰,۵۲	۰,۹۹
	۵	۰,۳۶	۰,۳۳	۰,۵۲	۰,۶۱	۰,۵۲	۰,۹۸
۳	۱	۰,۳۲	۰,۶۱	۱,۰۷	۰,۶۷	۰,۷۱	۱,۳۳
	۲	۰,۳۶	۰,۸۱	۱,۲۲	۰,۶۱	۰,۸۷	۱,۲۵
	۳	۰,۶۴	۰,۳۷	۰,۸۵	۰,۳۳	۰,۳۶	۰,۵۲
	۴	۰,۳۷	۰,۲۴	۱,۳۰	۰,۶۲	۰,۸۳	۱,۴۷
	۵	۰,۴۱	۰,۰۰	۰,۷۱	۰,۵۸	۰,۱۵	۰,۲۱
۴	۱	۰,۴۹	۰,۴۲	۱,۱۴	۰,۴۷	۰,۴۱	۱,۴۲
	۲	۰,۳۲	۰,۱۸	۱,۱۲	۰,۶۸	۰,۸۴	۱,۲۸
	۳	۰,۶۵	۰,۷۰	۰,۷۵	۰,۳۱	۰,۳۲	۰,۰۰
	۴	۰,۱۲	۰,۱۱	۱,۲۰	۰,۸۷	۰,۰۳	۰,۰۰
	۵	۰,۲۱	۰,۲۷	۱,۱۱	۰,۷۴	۰,۴۲	۰,۰۰
۵	۱	۰,۰۰	۰,۴۰	۰,۷۱	۱,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
	۲	۰,۳۹	۰,۴۷	۰,۳۲	۰,۵۹	۰,۱۵	۰,۲۷
	۳	۰,۳۷	۰,۲۲	۱,۵۱	۰,۵۷	.۰,۸۱	۰,۰۰
	۴	۰,۳۱	۰,۰۰	۰,۶۴	۰,۶۷	۰,۶۴	۱,۳۰
	۵	۰,۲۱	۰,۳۲	۱,۴۰	۰,۷۱	۰,۰۰	۰,۰۰
میانگین		۰,۳۶۸۴	۰,۳۴۳۲	۱,۰۰۰۰	۰,۶۰۱۶	۰,۴۵۵۲	۰,۷۲۰۰

کیفیت، فاصله و گوناگون که در جدول (۵) ارائه می‌شود. هر یک از شاخص‌ها هر چه بیشتر باشند، مطلوبیت روش بیشتر است.

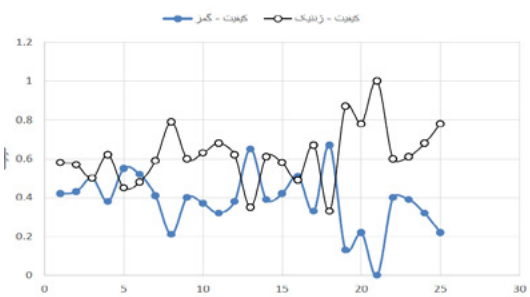
نمودارهای ۱ الی ۳ مقایسه‌ای شاخص‌های ارزیابی را نشان می‌دهند. هر یک از شاخص‌ها هر چه بیشتر باشند، مطلوبیت روش بیشتر است.

تحلیل حساسیت پارامترهای ضروری

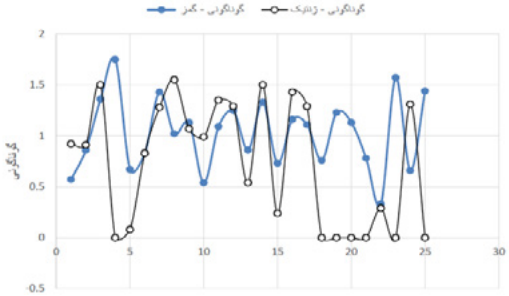
در این بخش جهت ارائه چشم‌اندازهای مدیریتی چندین تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای اساسی مسئله مزبور صورت



نمودار ۲- مقایسه‌ای برای شاخص ارزیابی فاصله



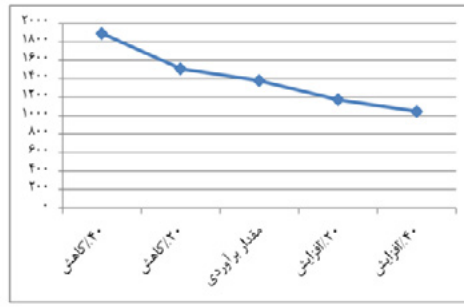
نمودار۱- مقایسه‌ای برای شاخص ارزیابی کیفیت



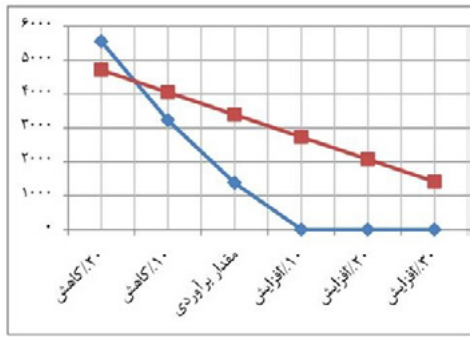
نمودار ۳- مقایسه‌ای برای شاخص ارزیابی گوناگونی

www.SID.ir

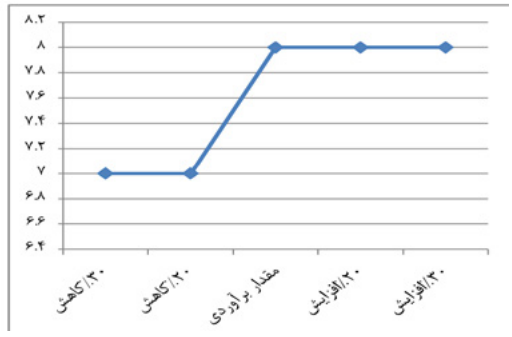
Archive of SID



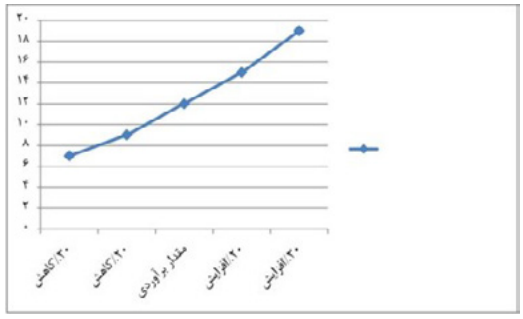
نمودار ۴- تحلیل حساسیت کمبود کالا نسبت به ظرفیت مراکز توزیع



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



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



نمودار ۷- تحلیل حساسیت تعداد مراکز احداث‌شده نسبت به تعداد نقاط تقاضا

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 صورت‌گرفته برای مقالات این حوزه مهمترین پارامترهای موجود جهت بررسی برای مدل‌های ارائه‌شده 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 خدمت‌رسانی‌نشده شود (نمودار ۵). رابطه تقاضای کالا با تعداد مراکز توزیع احداث‌شده در نمودار (۶) و تعداد مراکز احداث‌شده با تعداد نقاط تقاضا در نمودار (۷) نشان داده می‌شود.

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.

جدول ۶- احتمال وقوع سناریوهای مختلف

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

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۷ - مجموعه کارخانه‌ها

ردیف	نام منطقه	محل کارخانه
u_1	۱	ازگل
u_2	۲	سعادت آباد
u_3	۳	ولیعصر(پارک ملت)
u_4	۴	وفادار(پارک پلیس)

جدول ۸- مجموعه مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز توزیع

ردیف	نام ناحیه	مراکز توزیع کالا
i_1	۱	فرمانیه
i_2	۲	اوین
i_3	۳	گلابدره
i_4	۴	جماران
i_5	۵	اراج
i_6	۷	تجریش
i_7	۸	چیذر
I_8	۹	ازگل

جدول ۹- مجموعه نقاط تقاضا

ردیف	نام ناحیه	مجموعه نقاط تقاضا
j_1 j_2	۱	حصار بوعلی فرمانیه
j_3 j_4 j_5	۲	اوین ولنجک زعفرانیه
j_6 j_7	۳	دربند امام زاده قاسم
j_8 j_9 j_{10}	۴	دزاشیب جماران نیاوران
j_{11} j_{12}	۵	کاشانک دارآباد
j_{13} j_{14} j_{15}	۷	باغ فردوس تجریش قیطریه
j_{16} j_{17}	۸	چیذر حکمت
j_{18} j_{19}	۹	اراج ازگل

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

جدول ۱۰- برآورد پارامترها تحت سناریوهای مختلف

ناحیه	نقاط تقاضا	سناریوها	d_{jkts}	t_{ijkvs}	h^p_{ijs}	τ_{jks}
۱	حصار بوعلی فرمانیه	سناریو۱	۱۰۱۰	۵۰۷	٪۲	۱۰۰
		سناریو۲	۱۵۴۶	۷۹۱	٪۵	۲۰۰
		سناریو۳	۱۵۰۰	۵۰۰	٪۱۰	۳۰۰
۲	اوین ولنجک زعفرانیه	سناریو۱	۴۷۸	۱۹۸	٪۲	۱۰۰
		سناریو۲	۱۰۵۴	۵۶۲	٪۵	۲۰۰
		سناریو۳	۱۸۹۴	۸۶۴	٪۱۰	۳۰۰
۳	دربند امام زاده قاسم	سناریو۱	۱۱۱۵	۴۰۷	٪۲	۱۰۰
		سناریو۲	۱۵۶۲	۷۰۲	٪۵	۲۰۰
		سناریو۳	۱۸۹۰	۶۰۰	٪۱۰	۳۰۰
۴	دزاشیب جماران	سناریو۱	۱۲۱۴	۵۸۹	٪۲	۱۰۰
		سناریو۲	۹۳۶	۳۷۳	٪۵	۲۰۰
		سناریو۳	۱۱۰۱	۴۷۳	٪۱۰	۳۰۰
۵	کاشانک دارآباد	سناریو۱	۱۶۳۵	۸۶۴	٪۲	۱۰۰
		سناریو۲	۶۴۳	۲۳۲	٪۵	۲۰۰
		سناریو۳	۱۵۰۰	۳۰۰	٪۱۰	۳۰۰
۷	باغ فردوس تجریش قیطریه	سناریو۱	۱۵۹۹	۷۷۵	٪۲	۱۰۰
		سناریو۲	۱۸۴۵	۸۵۸	٪۵	۲۰۰
		سناریو۳	۱۰۵۶	۴۸۰	٪۱۰	۳۰۰
۸	حکمت چیذر	سناریو۱	۱۷۵۸	۶۸۷	٪۲	۱۰۰
		سناریو۲	۱۲۹۰	۶۲۷	٪۵	۲۰۰
		سناریو۳	۱۸۰۰	۷۰۰	٪۱۰	۳۰۰
۹	اراج ازگل	سناریو۱	۴۳۴	۴۵۴	٪۲	۱۰۰
		سناریو۲	۳۸۶	۲۹۵	٪۵	۲۰۰
		سناریو۳	۱۵۰۰	۷۰۰	٪۱۰	۳۰۰

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱۱-تخصیص مشتری به پایگاه

نام ناحیه	نقاط تقاضا	سناریوها	فرمانیه	اوین	گلابدره	جماران	اراج	تجریش	چیذر	ازگل
۱	حصار بوعلی فرمانیه	سناریو۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
		سناریو۲	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
		سناریو۳	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱
۲	اوین ولنجک زعفرانیه	سناریو۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱
		سناریو۲	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰
		سناریو۳	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰
۳	دربند امام زاده قاسم	سناریو۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰
		سناریو۲	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰
		سناریو۳	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰
۴	دزاشیب جماران نیاوران	سناریو۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰
		سناریو۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱
		سناریو۳	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰
۵	کاشانک دارآباد	سناریو۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
		سناریو۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	
		سناریو۳	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰
۷	باغ فردوس تجریش قیطریه	سناریو۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۰
		سناریو۲	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱
		سناریو۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۸	حکمت چیذر	سناریو۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱
		سناریو۲	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱
		سناریو۳	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰
۹	اراج ازگل	سناریو۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰
		سناریو۲	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱
		سناریو۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	

جدول ۱۲- میزان کمبود کالا در نقطه تقاضا

ناحیه	نقاط تقاضا	سناریوها	کمبود
۱	حصار بوعلی فرمانیه	سناریو۱	۵۰
		سناریو۲	۴۰
		سناریو۳	۴۰
۲	اوین ولنجک زعفرانیه	سناریو۱	۳۰
		سناریو۲	۳۰
		سناریو۳	۳۰
۳	دربند امامزاده قاسم	سناریو۱	۱۰
		سناریو۲	۱۰
		سناریو۳	۱۰
۴	دزاشیب جماران	سناریو۱	۱۰
		سناریو۲	۱۵
		سناریو۳	۲۰
۵	کاشانک دارآباد	سناریو۱	۲۵
		سناریو۲	۲۰
		سناریو۳	۲۰
۷	باغ فردوس تجریش قیطریه	سناریو۱	۰
		سناریو۲	۰
		سناریو۳	۱۰
۸	حکمت چیذر	سناریو۱	۱۰
		سناریو۲	۱۰
		سناریو۳	۱۰
۹	اراج ازگل	سناریو۱	۴۰
		سناریو۲	۴۰
		سناریو۳	۴۰

جدول ۱۳- متغیرهای باینری

ناحیه	سناریوها	M_{is}	a_{is}	Ma_{us}
۱	سناریو۱	۱	۱	۱
	سناریو۲	۰	۰	۱
	سناریو۳	۱	۱	۱
۲	سناریو۱	۱	۰	۱
	سناریو۲	۰	۱	۱
	سناریو۳	۱	۱	۱
۳	سناریو۱	۱	۱	۱
	سناریو۲	۰	۰	۰
	سناریو۳	۱	۰	۱
۴	سناریو۱	۱	۰	۰
	سناریو۲	۰	۱	۰
	سناریو۳	۱	۱	۱
۵	سناریو۱	۱	۰	۱
	سناریو۲	۰	۰	۰
	سناریو۳	۰	۱	۱
۶	سناریو۱	۱	۱	۱
	سناریو۲	۰	۱	۱
	سناریو۳	۱	۰	۱
۷	سناریو۱	۱	۱	۱
	سناریو۲	۰	۰	۱
	سناریو۳	۰	۱	۱
۸	سناریو۱	۱	۰	۰
	سناریو۲	۱	۰	۰
	سناریو۳	۰	۱	۱

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱۴- مسیریابی خودروها

سناریوها	مسیرها x^{p}_{ijvts}							
سناریو۱	۲-۱	۴-۲	۳-۴	۵-۳	۶-۵	۸-۶	۷-۸	۹-۷
سناریو۲	۲-۱	۴-۲	۳-۴	۵-۳	۸-۵	۶-۸	۷-۶	۹-۷
سناریو۳	۲-۱	۴-۲	۳-۴	۵-۳	۶-۵	۸-۶	۷-۸	۹-۷

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 ارائه‌شده ضمن تعیین مکان استقرار تسهیلات و تعیین شیوه تخصیص مشتریان به آن‌ها مسیرهای بهینه خدمت‌رسانی را به گونه‌ای تعیین می‌کند که نرخ تعداد مشتریان پوشش‌داده‌نشده و میانگین زمانهای سفر در واحد زمان کمینه شوند. شبکه زنجیره تأمین طراحی‌شده باید قابلیت پاسخ‌دهی به نیازهای مشتریان را هنگام وقوع ریسک‌اختلال مانند اختلال در تسهیلات را دارا باشد. بنابراین این شبکه‌ها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که به هنگام وقوع اختلال توانایی فراهم‌آوری محصولات و خدمات به مشتریان را درهر 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 ارائه‌شده سه‌هدفه است، برای حل آن از روش محدودیت اپسیلون 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 اپسیلون 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 به‌دست‌آمده می‌توان این گونه نتیجه گرفت که میانگین ارزش کیفیت برای تمام مثال‌ها و اجراها برای روش محدودیت اپسیلون 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 اپسیلون 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 ارائه‌شده 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)، ۲۰۴-۱۶۹.

۲. کلانتر نیستانکی، 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)، ۱۷-۵.

۳. صادقی‌مقدم، محمدرضا؛ قاسمیان صاحبی، ایمن؛ حیدری دهویی، 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)، ۵۶-۴۵.

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–

www.SID.ir

Archive of SID

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., Kadadevaramath 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. Nekooghadirli, 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. TransportationResearch 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. کلانترنیستانکی، حوریه؛ مظفری، مرضیه. (۱۳۹۶). طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار برای خدمات پزشکی در شرایط عدم قطعیت. نشریه علمی مدیریت زنجیره تأمین، دوره ۲۰ (شماره ۵۹)، ۲۸-۱۸.

33. Azad, N., G. K. D. Saharidis, H. Davoudpour, H. Malekly, andS. A. Yektamaram. (2013). Strategies for Protecting supply chain networks against facility and transportation disruptions: An improved benders decompositionapproach. 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., Raziei, 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 andweighted nodes for perishable food delivery. Proceeding of the 2nd National Conference on Industrial Engineering & Systems. 25-26.

۱۲. کلانتری، محدثه؛ پیشوایی، میرسامان. (۱۳۹۵). یک مدل برنامه‌ریزی استوار امکانی برای برنامه‌ریزی اصلی زنجیره تأمین دارو. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید ، دوره ۴(شماره ۷)، ۶۷-۴۹.

۱۳. کاظمی، سید محمود؛ ربانی، مسعود. (۱۳۹۵). روش شاخه وبرش برای مسئله موجودی-مسیریابی واحدهای خون: یک مطالعه موردی. نشریه علمی مدیریت زنجیره تأمین، 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 multistage 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

www.SID.ir

Archive of SID

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)، ۱۰۶-۹۵.

۳۷. جمالی، حسین؛ بشیری، مهدی؛ توکلی‌مقدم، 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.

www.SID.ir