نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

IERPS

ISSN: 2345-2269

سال هشتم، شماره شانزدهم، بهار و تابستان ۱۳۹۹، صفحه ۱۷۱-۱۸۳

www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/ier.2020.21281.1953

مقاله منتخب شانزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع

مدل‌سازی و حل مسئله مکان‌یابی- مسیریابی برای محصولات فسادپذیر در گراف چندگانه با در نظر گرفتن آلودگی وسایل نقلیه و اختلال انبارها

حمید تیکنی[۱]، مصطفی ستاک[۲*]، زهره شاکری کبریا[۳]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲. دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۸/۱۲/۲۵

پذیرش ۱۳۹۹/۲/۳

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

مدل مکان‌یابی-مسیریابی

شبکه‌ی چندگانه

مدل تصادفی دومرحله‌ای

اختلال

آلودگی وسایل‌نقلیه

خلاصه

گسترش زیرساخت‌های شهری و توسعه‌ی شهرنشینی ازیک‌طرف و از سوی دیگر افزایش تقاضا و رشد شرکت‌های توزیع در فضاهای شهری و بین‌شهری باعث بروز پیچیدگی‌هایی در امر لجستیک و حمل‌ونقل کالا شده است. در این راستا بسیاری از شرکت‌ها و کارخانجات محصولات غذایی تولید و توزیع می‌کنند که کیفیت آن‌ها با افزایش زمان توزیع کاهش پیدا می‌کند. در این مطالعه به ارائه و بررسی مدل مکان‌یابی-مسیریابی در گراف چندگانه که مسیرهای موازی دارای شرایط ترافیک مختلف و وابسته به زمان هستند، پرداخته شده است. مدل ارائه‌شده علاوه بر کاهش هزینه‌های ناشی از مکان‌یابی و لجستیک به دنبال کاهش آلودگی تولید شده توسط وسایل نقلیه و همچنین بیشینه‌سازی کیفیت مربوط به محصولات غذایی می‌باشد. برای قرابت مدل به شرایط واقعی مسأله تحت شرایط عدم قطعیت مدل‌سازی شده و خرابی انبارها نیز در شبکه‌ی حمل‌ونقل امکان‌پذیر می‌باشد. در ادامه مدل ارائه شده حل و موردبررسی قرار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از گراف چندگانه نه‌تنها باعث کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و اثرات زیست‌محیطی می‌شود بلکه افزایش کیفیت، تازگی محصولات ارسال شده را به همراه دارد و به طراحی مؤثر شبکه‌ی لجستیکی برای محصولات فسادپذیر کمک می‌کند.

۱. مقدمه

امروزه با توجه به جهانی‌شدن بازارها، رقابت تنگاتنگ بنگاه‌ها برای تداوم حیات و داشتن سهم بیشتر از بازار، فضای پیچیده و بسیار سختی برای تصمیم‌گیری در حوزه حمل‌ونقل ایجاد شده است. با توجه به مسائل به‌وجودآمده پیرامون کمبود منابع و تلاش برای آلودگی تولیدی، تصمیم‌گیری مدیران در مراحل مختلف از تصمیم‌گیری در سطوح استراتژیک مانند ساخت انبارها برای ذخیره کالا تا سطوح عملیاتی مانند نحوه جابه‌جایی، زمان و نوع حرکت وسایل‌نقلیه گسترش یافته و گزینه‌های مختلفی پیش روی آن‌ها قرار داده است.

در مدل‌های سنتی زنجیره‌تأمین سطوح مختلف زنجیره به‌صورت جداگانه موردبررسی می‌شدند، این در حالی است که تحقیقات نشان داده یکپارچه‌سازی سطوح مختلف باعث کاهش هزینه کلی فرآیند توزیع و افزایش کارایی می‌شود. فعالیت‌های زنجیره‌تامین و تدارکات یکی از منابع اصلی آلودگی محیط‌زیست است. بر مبنای گزارشات آژانس محیط‌زیست اروپا، فعالیت‌های حمل‌ونقل منبع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای است. براساس این داده‌ها، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۹ به میزان ۲۷ درصد افزایش

* نویسنده مسئول: مصطفی ستاک

تلفن: ۸۴۰۶۳۳۷۳-۰۲۱؛ پست الکترونیکی: setak@kntu.ac.ir

یافته است. فاکتور مهم و اساسی دیگر که یک سیستم توزیع را با مشکل مواجه خواهد ساخت قابلیت اطمینان تسهیلات می‌باشد. وجود بلایای طبیعی و غیرطبیعی موجب آسیب‌پذیری سطوح استراتژیک زنجیره شده و طبیعتاً بخش‌های عملیاتی و تاکتیکال را نیز به شدت تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. برای مثال در سال ۲۰۰۱، آتش‌سوزی در یکی از کارخانه‌های شرکت فیلیپس باعث به تعلیق افتادن فعالیت‌ها شرکت شده است [۱]. برای این منظور در نظرگیری منابع و تسهیلات جایگزین برای زمانی که یک تسهیل از دست می‌رود (دچار بحران می‌شود) امری بسیار حیاتی و مهم می‌باشد. در این مطالعه ما به ارائه‌ی مدلی برای توزیع مواد غذایی فاسدشدنی با در نظرگیری شرایط واقعی (خرابی تسهیلات، شرایط ترافیکی، وجود مسیرهای موازی و ...) در محیط‌های شهری پرداخته‌ایم.

مدل ارائه شده در این پژوهش به‌صورت یک مدل دو هدفه‌ی بهینه‌سازی مسیریابی-مکان‌یابی ارائه داده شده است. تابع هدف اول مدل به‌دنبال کاهش هزینه‌های طراحی شبکه، هزینه‌های عملیاتی و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و تابع هدف دوم به‌دنبال افزایش کیفیت تقاضای محصول در زمان تحویل به مشتری می‌باشد. پژوهش حاضر اولین مقاله‌ای است که مدل دومرحله‌ای احتمالی مکان‌یابی و مسیریابی با در نظر گرفتن ترافیک وابسته به زمان را در گراف چندگانه موردبررسی قرار داده است. در مسیریابی وسایل نقلیه وابسته به زمان، زمان سفر بین دو گره به فاصله بین هر دو گره و زمان حرکت در روز بستگی دارد (زمان ازدحام، شرایط آب و هوایی و ...). با توجه به وجود خلأهای مطالعاتی مختلف که در حوزه‌ی مکان‌یابی و مسیریابی مواد فاسدشدنی مشاهده می‌شود این مطالعه به‌دنبال پر کردن خلاهای مطالعاتی و ارائه‌ی مدلی جدید به‌منظور پاسخ‌دهی مناسب صنعت توزیع اقلام فاسد شدنی در پیچیدگی محیط شهری می‌باشد. نوآوری‌های این مقاله به‌صورت موردی در زیر آورده شده است:

۱. مطالعه‌ی حاضر اولین مقاله‌ای است که در مدل مکان‌یابی مسیریابی مبحث ترافیک وابسته به زمان را به‌صورت مدل دو مرحله‌ای تصادفی دخیل کرده است. در مدل ارائه داده‌شده، در مرحله اول تصمیمات مربوط به ساخت انبار با توجه به ظرفیت و مسیرهای متصل به آن به‌همراه وسایل‌نقلیه گرفته می‌شود. در مرحله دوم با لحاظ کردن احتمالات لازم برای تخریب هریک از انبارها، انتخاب وسیله و مسیر حرکت از انبار به هریک از مشتریان و در نهایت تصمیم به سرویس‌دهی به مشتریان یا مشتری از دست رفته گرفته می‌شود.

۲. با توجه به پیچیدگی موجود در ساختار شهری این امکان وجود دارد که بین دو نقطه از شبکه مسیرهای مختلف وجود داشته باشد. این مفهوم تنها در برخی مطالعات تحت عنوان مسیریابی در شبکه چندگانه مطرح شده است. در این پژوهش در بخش مسیریابی برای قرابت بیشتر به دنیای واقعی، شبکه حمل‌ونقل به طور چندگانه لحاظ شده‌است. در بخش‌های بعدی کارایی شبکه چندگانه در حوزه شهری بیشتر توضیح داده شده‌است.

۳. از آنجایی‌که بروز بلایای طبیعی و غیرطبیعی به سیستم توزیع آسیب جدی وارد می‌کند، این مطالعه به بررسی و ارائه رویکردی برای زمانی که زنجیره‌ی عرضه با اختلال (از دست رفتن انبارها) مواجه می‌شود پرداخته است. واضح است که با تصمیم‌گیری نامناسب برای انتخاب محل احداث انبارها، هزینه زیادی از دست می‌رود و نیاز بسیاری از مشتریان در شرایط بحران برآورده نخواهد شد.

۴. مدل ارائه داده‌شده به‌صورت دو هدفه که در تابع هدف اول علاوه‌بر در نظرگیری هزینه‌های استراتژیکی مانند تأسیس انبار و هزینه‌های عملیاتی در مسیریابی، فاکتورهای آلاینده نیز لحاظ شده‌است. علاوه بر آن تابع هدف دوم به افزایش کیفیت و تازگی محصولات ارسالی به نقاط تقاضا می‌پردازد.

۲. مرور ادبیات

با توجه به شرایط سخت تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و ترکیب آن با تصمیمات عملیاتی وجود مدلی یکپارچه برای انتخاب محل انبارها، نوع وسایل‌نقلیه و مسیرهای حرکت از اهمیت بسیاری برخوردار است. یکپارچگی در تصمیم‌گیری باعث کاهش هزینه‌ها، بالا بردن دقت تصمیم‌گیری و کاهش زمان‌های سرویس‌دهی برای حفظ کیفیت خدمات و محصولات می‌شود.

۲-۱. مطالعات مربوط به مساله‌ی مکان‌یابی-مسیریابی

به‌طورکلی در نظر گرفتن مکان‌یابی انبار و مسیریابی وسایل‌نقلیه به‌صورت جداگانه باعث هزینه‌های اضافی خواهد شد. ایده ترکیب مکان‌یابی انبارها و مسیریابی وسایل‌نقلیه به ۵۰ سال پیش برمی‌گردد. در آن زمان، وابستگی درونی این دو تصمیم از قبل برجسته شده‌بود، اما روش‌های بهینه‌سازی و محاسباتی برای پرداختن به آن‌ها به‌طور یکپارچه، هنوز توسعه نیافته بود. اولین مطالعات مربوط به مکان‌یابی مسیریابی وسایل‌نقلیه به دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی بر می‌گردد. یکی از اولین نویسندگان واتسون-گاندی و دورن بودند که به تحلیل و بررسی مسئله مکان‌یابی- مسیریابی پرداختند [۲]. در مسأله‌یLRP هدف ادغام محدودیت‌های تصمیم‌گیری برای ایجاد یا باز کردن انبار یا مجموعه‌ای از انبارها و طراحی تعدادی از مسیرها برای هر انبار باز می‌باشد؛ که تابع هدف شامل حداقل‌سازی هزینه‌های کل (هزینه‌های ثابت بازگشایی انبارها و مسیرها) می‌باشد. کاربردهای آن شامل جمع‌آوری زباله‌ها، مکان‌یابی صندوق‌های پستی، تحویل بسته‌ها، شبکه دسترسی ارتباط سیار و توزیع خواربار می‌باشد. وو و همکاران [۳] جهت حل مسئله مکان‌یابی مسیریابی با ناوگان حمل‌ونقل متنوع یک روش ابتکاری بر پایه تجزیه (مسئله را به دو زیرمسئله مکان‌یابی و مسیریابی تقسیم کردند) و یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید جهت بهینه سازی ارائه نمودند. یعقوبی و اکرمی [۴] به مدل‌سازی و حل مسأله‌ی مکان‌یابی-مسیریابی برای حمل مواد اولیه قابل فساد پرداختند. با توجه به پیچیدگی مسأله، آن‌ها از دو الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان و بهینه سازی ازدحام ذرات برای حل مسأله استفاده کردند. همچنین، وانگ و همکاران [۵] مدل ریاضی دو هدفه برای لجستیک مواد غذایی با تجهیزات برودتی ارائه دادند. مدل آن‌ها نه تنها

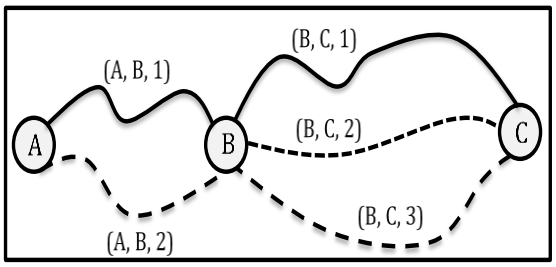
کاهش هزینه‌های عملیاتی و مصرف سوخت را شامل می‌شود بلکه رضایت مشتریان را نیز لحاظ می‌کند.

۲-۲. پنجره‌ی زمانی در مسیریابی وسایل نقلیه

در سال ۱۹۸۲ یکی از مهمترین مشتقات VRP یعنی مسیریابی وسایل‌نقلیه همراه با پنجره‌های زمانی معرفی شد، این نوع مسئله در بسیاری از مقالات در زمینه مکان‌یابی مسیریابی گسترش یافته است [۶]. در مسائل همراه با پنجره‌های زمانی هر مشتری دارای پنجره زمانی خاص برای سرویس‌پذیری می‌باشد. یک پنجره زمانی در واقع یک بازه زمانی است که زمان شروع خدمت را برای مشتریان مشخص می‌کند. برای هر مشتری زمان سفر و زمان سرویس‌دهی باید درنظر گرفته‌شود. بنابراین اگر خودرو زودتر از حد پایین پنجره زمانی به مشتری برسد، باید در آن محل توقف کرده تا زمان موردنظر برای سرویس‌دهی شروع شود. در این راستا، پانبون و همکاران [۷] با هدف بررسی تاثیر عوامل مختلف هزینه در سیستم‌های لجستیک یک مسئله مکان‌یابی مسیریابی به همراه پنجره‌زمانی را در نظر گرفتند و تاثیر عواملی مانند مکان انبار، اندازه انبار و اندازه وسیله‌نقلیه را بر روی این سیستم توزیع موردبررسی قرار دادند. در مطالعه‌ای دیگر پانبون و همکاران [۸] یک الگوریتم شاخه و قیمت برای مسئله مکان‌یابی مسیریابی همراه با پنجره زمانی ارائه دادند. همچنین تیکنی و ستاک [۹] از پنجره زمانی نرم برای مسیریابی وسایل نقلیه در زمان بحران استفاده کردند.

۲-۳. مسیریابی در شبکه‌ی چندگانه

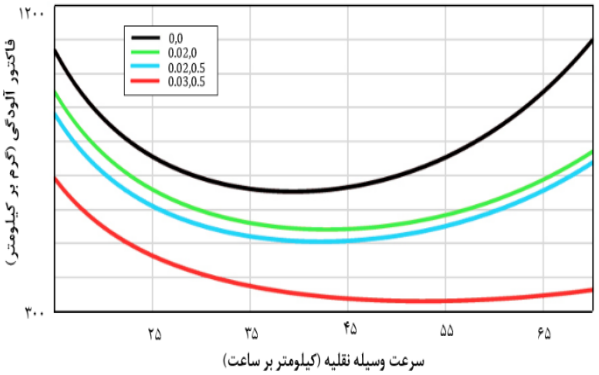
در مسائل کلاسیک VRP فرض می‌شود که بین هر دو گره فقط یک یال مستقیم وجود دارد، در حالیکه در شبکه‌های پیچیده شهری چند مسیر مستقیم بین گره‌ها وجود دارد. بنابراین رانندگان در بازه‌های زمانی مختلف بسته به شرایط ترافیکی، مسیرهای موازی جهت طی کردن مسیر دارند. شکل (۱) نمونه شبکه گراف چندگانه را نشان می‌دهد. بحث وجود شبکه‌های چندگانه در مسیریابی وسایل نقلیه توسط گارایکس و همکاران [۱۰] مطرح شد. در این پژوهش یال‌های شبکه دارای دو مشخصه‌ی زمان و هزینه بودند. در ادامه سایر پژوهشگران مانند لای و همکاران [۱۱]، رین هارد و همکاران [۱۲]، تیچا و همکاران [۱۳]، تیچا و همکاران [۱۴] به توسعه‌ی مدل و روش‌هایی در مسیریابی وسیله نقلیه در شبکه چندگانه شدند. در این حین مفهوم ترافیک وابسته به زمان در مسیریابی برای اولین‌بار توسط ستاک [۱۵] و با شرایط FIFO ارائه شد و در ادامه ستاک و همکاران [۱۶] گراف چندگانه را با مسیریابی آلودگی ترکیب کردند. در مقاله ستاک و همکاران [۱۷] یک مدل مسیریابی وسایل‌نقلیه پویا برای عملیات تدارکات اورژانس در وقوع بلایای طبیعی ارائه شده است. هدف یافتن مسیرهای بهینه برای یک ناوگان وسایل‌نقلیه بوده تا کالاهای اضطراری را به مجموعه‌ای از مناطق آسیب دیده با در نظر گرفتن وجود بیش از یک یال بین هر دو گره در شبکه (شبکه چند گراف) ارسال کنند. همچنین تیکنی و ستاک [۱۸] لجستیک بحران را در شبکه‌ی چندگانه با یال‌های چندمشخصه موردبررسی قرار دادند و روش‌های حل کارایی برای حل این مدل ارائه دادند. همان‌طور که از ادبیات موضوع مشخص است، بحث گراف‌های چندگانه هنوز در مسائل مکان‌یابی-مسیریابی درنظر گرفته نشده‌است و این پژوهش اولین مطالعه در این موضوع می‌باشد.



شکل (۱): یال‌های موازی موجود بین نقاط مختلف در یک شبکه‌ی چندگانه

۲-۴. مسئله مکان‌یابی-مسیریابی پایدار و اقلام فسادپذیر

به غیر از هزینه‌های حمل‌ونقل در بهینه‌سازی سیستم لجستیک، ویژگی‌های پایدار شبکه نیز قابل‌توجه پژوهشگران است. حفاظت از محیط‌زیست یکی از اهداف قابل‌توجهی از پایداری است که شامل کنترل انتشار جهانی کربن می‌شود. رشد روزانه و توسعه شرکت‌های حمل و توزیع، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، به ویژه CO_2 را افزایش داده‌است. بنابراین، برای طراحی شبکه توزیع سبز، اثرات وسایل‌نقلیه بر محیط‌زیست باید به‌عنوان یک معیار تصمیم جداگانه مورد توجه قرار گیرد. مادن و همکاران [۱۹] سرعت متغیر با زمان را در مسیریابی بررسی کردند. با وجود اینکه مدل آن‌ها بر کاهش زمان کل سفر بیش از کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تأکید داشت، ۷ درصد کاهش انتشار CO_2 را گزارش کردند. فیگلوزی [۲۰] مساله مسیریابی خودروها با هدف کاهش هزینه‌های انتشار آلایندگی را بررسی کرد، که آلایندگی وابسته به سرعت سفر و فاصله سفر است. همچنین سه نوع شرایط ترافیکی در نظر گرفت، شرایط بدون ترافیک، شرایط ترافیک متوسط و ترافیک شدید. نویسنده معتقد است که سفر در شرایط بدون ترافیک موجب کاهش انتشار گازها می‌شود، اما گاهی اوقات روند متفاوتی مشاهده می‌شود. جبلی و همکاران [۲۱] با اشاره به تراکم نشان می‌دهند که حرکت آرام یک وسیله‌نقلیه میزان انتشار CO_2 را افزایش می‌دهد. آن‌ها با توجه به تاثیر محدودیت سرعت خودرو، زمان سفر و انتشار CO_2 را در TDVRP بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که کاهش ۱۱٫۲٪ در انتشار کربن به‌طور متوسط باعث ۱۴٫۸٪ افزایش در زمان سفر است. در شکل (۲) مشخص است شده که با افزایش سرعت وسیله تا محدوده‌ی مشخصی، آلودگی کاهش یافته و پس از آن با صعود سرعت آلایندگی نیز شدت می‌گیرد.



شکل (۲): عامل انتشار برای سرعت‌های مختلف خودرو

در طی دهه گذشته، توسعه و استفاده از مدل‌های تحقیقاتی عملیاتی در زنجیره‌تأمین مواد غذایی، بسیاری از محققان را جذب کرده است. مواد غذایی تازه و محصولاتی مانند میوه سریع فاسد می‌شوند و عمر مفید آن‌ها در افق زمانی محدود است. همچنین برخلاف سایر کالا، کیفیت مواد غذایی در طول فعالیت‌های پایین دست در زنجیره تأمین به‌طور مداوم کاهش می‌یابد. از این رو، روند برخورد با شبکه‌های زنجیره‌تأمین غذایی پیچیده است. یکی از اهداف اصلی در توزیع محصولات فاسدشدنی درخشندگی آن‌ها در هنگام تحویل به مناطق تقاضا است. این موضوع تأثیر مستقیمی بر پاسخگویی شبکه دارد. در محصولات حساس به زمان، ارزش آن‌ها در طول زمان کاهش می‌یابد. بنابراین، در زنجیره‌تامین موادغذایی، تمرکز بیشتر بر کیفیت کالاها و به حداقل رساندن زمان حمل و یا حداکثرسازی کیفیت محصولات در زمان تحویل باید مورد توجه قرار گیرد [۲۲].

۲-۵. اختلال در مسئله‌ی مکان‌یابی-مسیریابی

مدیریت ریسک نقش مهمی در مدیریت و کاهش خطرات در زنجیره‌تأمین ایفا می‌کند که به دو دسته عمده عملیات و اختلال تقسیم می‌شود. خطرات عملیاتی بر عملکرد عناصر زنجیره‌تأمین تأثیری ندارد و تنها بر عوامل عملیاتی تأثیر می‌گذارند که عمدتا ناخواسته‌اند. خطرات اختلال به طور کامل یا به‌طور جزئی عملکرد عناصر زنجیره‌تامین را متوقف می‌کنند. این نوع ریسک ناشی از اختلالات عمده است که ناشی از طبیعت یا بلایای طبیعی مانند زمین لرزه، سیل، طوفان و حملات تروریستی است. مقاله احمدی جاوید و صدیقی [۲۳] اولین مقاله‌ای است که به مسئله مکان‌یابی مسیریابی وسیله‌نقلیه تحت اختلال پرداخته‌است. در مسئله مطرح شده توسط آن‌ها مجموعه‌ای از تولیدکننده– توزیع‌کننده یک کالای واحد را تولید می‌کنند و به‌دست مشتریان می‌رسانند، درحالی‌که ظرفیت تولید هر تولیدکننده– توزیع‌کننده به‌صورت تصادفی به علت انواع مختلف اختلال تغییر می‌کند. ژانگ و همکاران [۲۴] مسئله مکان‌یابی-مسیریابی قابل‌اعتماد با محدودیت ظرفیت را بررسی کردند که در آن انبارها به‌صورت تصادفی مختل شده و مشتری‌های تخصیص داده شده به انبارهای مختل باید توسط انبارهای سالم سرویس‌دهی شوند. کی و همکاران [۲۵] نیز مسئله مکان‌یابی- مسیریابی با امکان بروز اختلال در تسهیلات را مطالعه کردند. آن‌ها یک فرمولاسیون عددصحیح خطی ارائه کردند که به تعیین مکان تسهیلات و مسیریابی خروجی‌ها به‌صورتی می‌پردازد که هزینه‌های راه‌اندازی، مسیریابی و جریمه در کل سناریوهای مختلف حداقل شود.

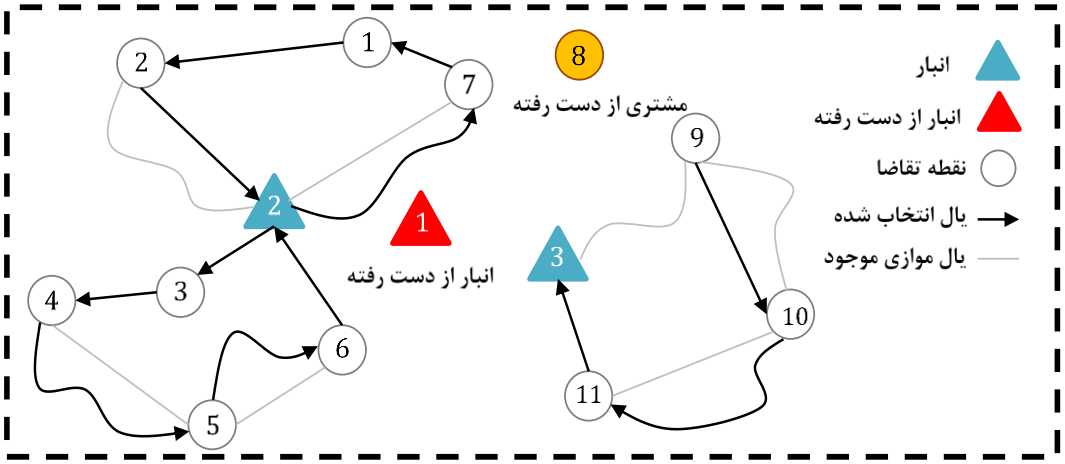
۳. مدل پیشنهادی مکان‌یابی مسیریابی آلودگی تحت احتمال اختلال

در این بخش مدل پیشنهادی برای مکان‌یابی مسیریابی آلودگی آورده شده‌است. در ابتدا مدل بدون لحاظ سناریو به انتخاب انبارهای مورد نیاز می‌پردازد، و در مرحله دوم مدل در حالت سناریوی اختلال تصمیمات لازم را می‌گیرد. در این مدل شرایط ترافیکی دارای اهمیت بالایی می‌باشد. این اهمیت با تعریف بازه‌های زمانی متفاوت مانند بازه ازدحام، بازه نیمه‌ازدحام و بازه خلوت معرفی شده و برخی مشخصه‌های مسیر مانند سرعت وسایل‌نقلیه در هریک از بازه‌ها متفاوت خواهد بود. تفاوت در بازه‌های حرکتی و سرعت وسایل‌نقلیه باعث تولید مقادیر متفاوت گازهای آلاینده شده و مدل علاوه بر توجه به کاهش هزینه‌های عملیاتی سعی در کاهش انتشار آلاینده‌های تولیدی توسط وسایل‌نقلیه نیز دارد. زمان حرکت وسیله‌نقلیه از هر گره توسط مدل تعیین شده تا بهترین زمان رسیدن به هر مشتری با توجه به پنجره‌های زمانی مشتریان به‌دست آید. در این مدل مشتریان دارای پنجره زمانی نیمه نرم بوده و همانطور که در بخش مرور ادبیات توضیح داده شد، تخطی از حد بالای زمانی دوم دارای جریمه می‌باشد. هر مشتری با توجه به نیاز خود و محصول فسادپذیر، پنجره زمانی متناسب را تعیین کرده و شرکت ملزم به رساندن تقاضا در همان زمان درخواستی می‌باشد.

در این مدل مکان‌یابی-مسیریابی احتمال اختلال انبارهای متفاوت در سناریوهای مختلف موردبررسی قرار می‌گیرد. در این مدل سعی شده‌است علاوه‌بر درنظرگیری هزینه‌های عملیاتی و آلودگی تولید شده، بحث شکست و خرابی انبارها اعمال شود تا در صورت از دسترس خارج شدن یک انبار براساس شرایط طبیعی یا غیرطبیعی تصمیم‌گیری برای ارائه خدمت به مشتری توسط سایر انبارهای موجود یا از دست دادن مشتری انجام شود. این مدل براساس برنامه‌ریزی غیرقطعی دو مرحله‌ای انجام می‌شود. ایده اصلی برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای اینست که تصمیم‌گیری باید براساس اطلاعات موجود در زمان تصمیم‌گیری صورت گیرد و نمی‌تواند منتظر مشاهدات آینده باشد. براساس این اصل تصمیم مربوط به احداث انبارها در مرحله اول انجام می‌گیرد که وابستگی به سناریوهای مربوطه نداشته و سایر متغیرهای مدل براساس سناریوها اجرا شده و تصمیمات مرحله دوم می‌باشند. سناریوی صفر همان شرایط عادی است که مدل در حالت بدون شکست پاسخگوی مشتریان است. گاهی بنابر تشخیص مدل، خدمت‌دهی به برخی از مشتریان که انبارهای تخصیصی به آن‌ها دچار اختلال شده‌است، به علت فاصله زیاد از انبارهای سالم یا تقاضای کم صورت نمی‌گیرد و این مشتریان به‌عنوان مشتری از دست رفته مدل را دچار هزینه از دست‌رفته می‌کنند. در صورت بررسی این مدل برای امدادهای اورژانسی فرض مشتری از دست رفته باید حذف شود و

خدمت‌دهی به تمام مشتریان الزامی شود. برای در نظرگیری سناریوهای مربوط به اختلال انبارها، یک انبار اورژانسی با ظرفیت نامحدود در نظرگرفته شده است. در صورت نداشتن ظرفیت کافی انبارهای سالم یا هزینه بالای تخصیص مشتریان انبار مختل‌شده به سایر انبارهای سالم، این مشتریان به انبار اورژانسی وصل شده که به معنای مشتری از دست‌رفته می‌باشد. در صورتی‌که انبار تخصیصی به یک مشتری خراب شود و هزینه‌های تخصیص به سایر انبارهای موجود زیاد شود، مدل ترجیح می‌دهد تا مشتری را سرویس ندهد.

مسئله مکان‌یابی – مسیریابی با در نظر گرفتن آلودگی وسایل‌نقلیه برای محصولات فسادپذیر در شبکه‌های گراف چندگانه و امکان اختلال انبارها دارای دو تابع هدف می‌باشد. تابع هدف اول شامل کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی و انتشار آلاینده بوده و تابع هدف دوم شامل بیشینه‌سازی کیفیت سفارش مشتریان می‌باشد. در این مدل نشان داده می‌شود که یکی از موارد بسیار مهم در تحویل کالاهای فسادپذیر زمان تحویل آن‌ها با توجه به عمر مفیدشان می‌باشد. با توجه به درخشندگی محصولات در زمان تحویل، کیفیت محصول بررسی شده و در صورت کیفیت مطلوب، کالا توسط مشتری پذیرفته می‌شود. در شکل (۳) نمایی از شبکه مدل پس از وقوع اختلال نشان داده شده است.



شکل (۳): نمونه شبکه‌ی چندگانه‌ی موردبررسی پس از وقوع اختلال

یکی از متغیرهای تصمیم مسئله $x_{mlkvv's}$ می‌باشد. از آنجایی‌که شبکه شهری شبکه مولتی گراف بوده و بین برخی از گره‌ها بیشتر از یک مسیر مستقیم وجود دارد، اندیس m نشان‌دهنده یال انتخابی بین دو گره می‌باشد. درواقع مدل تشخیص می‌دهد در چه بازه زمانی باید از چه یالی حرکت کنیم تا طبق شرایط ترافیکی، میزان دیرکرد، زودکرد و تولید آلودگی به حداقل برسد، بنابراین اندیس l نشان‌دهنده بازه زمانی است که وسیله‌نقلیه حرکت خود را از گره مبدا شروع می‌کند. اندیس k نشان‌دهنده نوع وسیله نقلیه‌ای است که از انبار حرکت کرده و در سناریوی s بین دو گره v و v' حرکت می‌کند.

سایر پارامترها و نمادهای مدل ارائه شده در جدول (۱) آورده شده است. همچنین، متغیرهای تصمیم مسئله در جدول (۲) نشان داده شده‌اند.

جدول (۱): اندیس‌ها و پارامترهای مدل

اندیس‌ها	
کل گره‌ها	v' , v
بازه های زمانی	l
انبارها	$i \in v$
وسایل نقلیه	k
مسیرهای موازی	m
گره‌های مشتری	$j \in v$
سناریوها	s

پارامترها	
ثابت مربوط به شتاب	α
جریمه عبور از حد پایین پنجره زمانی	L_{time}
جریمه عبور از حد بالا پنجره زمانی	U_{time}
هزینه سوخت وسیله نقلیه k	κ_k
هزینه آلودگی وسیله نقلیه k	ζ_k
جریمه عبور از حد بالا پنجره زمانی	U_{time}
هزینه سوخت وسیله نقلیه k	κ_k
هزینه اولیه تأسیس انبار i	O_i
ظرفیت وسیله نقلیه k	C_k
هزینه اولیه وسیله نقلیه k	P_k
هزینه ثابت راننده k	S_k
وزن خالص وسیله نقلیه k	W_k
ثابت وسیله نقلیه k	β_k
عدد بزرگ	M
فاصله بین گره‌ها برای حرکت از مسیر m	$D_{mvv'}$
تعداد وسایل نقلیه نوع k در انبار i	Nu_{ik}
تقاضای گره v	q_v
زمان سرویس‌دهی به هر مشتری j	ST_j
ظرفیت انبار i	B_i
حد پایین زمان شروع سرویس‌دهی	e'_j
حد بالای زمان شروع سرویس‌دهی مشتری j	l'_j

پایین‌ترین حد شروع سرویس‌دهی مشتری j	e''_j
بالاترین حد شروع سرویس‌دهی مشتری j	l''_j
فاصله بین گره‌ها برای حرکت از مسیر j	$D_{mvv'}$
حد بالای بازه زمانی حرکت از v به v'	$UP_{lvv'}$
سرعت وسیله k بین دو گره در بازه l از یال m	$\nu_{mlkvv'}$
احتمال رخداد هر سناریو s	ξ_s

جدول (۲): متغیرهای تصمیم مسئله

متغیر باینری جریان حرکت	$x_{mlkvv's}$
متغیر باینری تخصیص گره مشتری به انبار	U_{ijs}
متغیر تصمیم احداث انبار	y_i
کیفیت محصول در نقطه j در سناریو	g_{js}
بار حمل شده وسیله نقلیه	$lc_{kvv's}$
زمان تاخیر وسیله نقلیه k	μ_{kjs}
زمان انتظار وسیله نقلیه k	σ_{kjs}
کل زمان وسیله نقلیه k	τ_{kjs}
زمان عزیمت	dt_{vks}

تابع هدف اول z_1 شامل کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی و انتشار آلایندگی است. اولین هزینه عملیاتی که در گام اول برنامه‌ریزی تصادفی تصمیم‌گیری می‌شود و به سناریوها وابسته نیست، هزینه‌های انتخاب و یا تاسیس انبارها در مکان‌های بالقوه می‌باشد.

$$\sum_i y_i\, O_i \qquad (۱)$$

هزینه عملیاتی دوم شامل هزینه ثابت مربوط به خرید یا استفاده از وسایل‌نقلیه می‌باشد که در هر سناریو و با احتمال متناسب با آن سناریو رخ می‌دهد.

$$\sum_m \sum_l \sum_k \sum_i \sum_j \sum_s \xi_s P_k\, x_{mlkijs} \qquad (۲)$$

هزینه سوم عملیاتی شامل هزینه‌های نیروی انسانی برای پرداخت دستمزد رانندگان بر حسب کل مدت زمانی که وسیله‌نقلیه در طی سفر خود می‌پیماید.

$$\sum_k \sum_j \sum_s \xi_s \tau_{kjs}\, S_k \qquad (۳)$$

هزینه نهایی عملیاتی، هزینه مربوط به دیرکرد (تأخیر) یا زودکرد (انتظار در حالت بدون کار مفید) وسیله‌نقلیه در گره مشتری می‌باشد. این مدت زمان براساس زمان رسیدن وسیله‌نقلیه به مشتری و پنجره زمانی آن‌ها محاسبه می‌شود.

$$\sum_k \sum_j \sum_s \xi_s U_{time}\, \mu_{kjs} \qquad (۴)$$

$$\sum_k \sum_j \sum_s \xi_s L_{time}\, \sigma_{kjs} \qquad (۵)$$

هزینه مربوط به تولید آلایندگی از مقاله بکتاس و لاپورته (۲۰۱۱) آورده شده است. قسمت اول انتشار آلایندگی مربوط به وزن وسیله‌نقلیه خالی، قسمت دوم مربوط به بار حمل شده توسط وسیله‌نقلیه در هر مسیر و قسمت سوم نیز انتشار آلودگی وابسته به سرعت وسایل‌نقلیه را نشان می‌دهد.

$$\sum_m \sum_l \sum_k \sum_v \sum_{v'} \sum_s \xi_s(\kappa_k + \varsigma_k)\alpha D_{mvv'} x_{mlkvv'} W_k \qquad (۶)$$

$$\sum_m \sum_l \sum_k \sum_v \sum_{v'} \sum_s \xi_s(\kappa_k + \varsigma_k)\alpha D_{mvv'} lc_{kvv's} \qquad (۷)$$

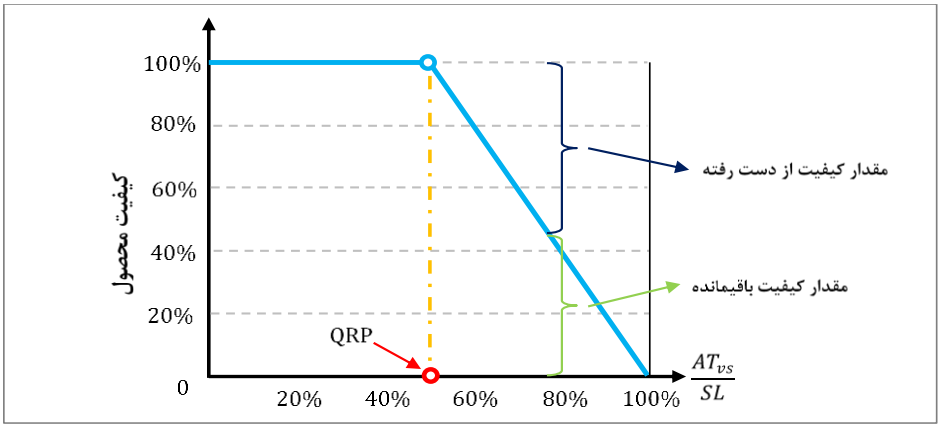
$$\sum_m \sum_l \sum_k \sum_v \sum_{v'} \sum_s \xi_s(\kappa_k + \varsigma_k)\beta_k D_{mvv'} x_{mlkvv's} \nu_{mlkvv'} \qquad (۸)$$

تابع هدف دوم شامل بیشینه‌سازی کیفیت مربوط به محصولات غذایی می‌باشد. یکی از روش‌های کارآمد برای نشان دادن فاسد شدن یک محصول با استفاده از قابلیت احتمال خرید بازار است و برای هر منطقه مشتری به شرح زیر است:

$$z_2 = \sum_s \sum_v \xi_s g_{vs} \qquad (۹)$$

$$g_{vs} = min\left\{\frac{1-\frac{AT_{vs}}{SL}}{1-QRP}, 1\right\} \qquad (۱۰)$$

زمان رسیدن به هر مشتری برابر $AT_{vs} = \sum_v dt_{vks} - ST_v$ می‌باشد. این مقدار از مجموع زمان عزیمت از گره مبدأ و مدت زمان حرکت تا رسیدن به گره مقصد (مشتری) به‌دست می‌آید. SL عمر مفید محصولات موردتقاضای مشتریان است و $\frac{AT_{vs}}{SL}$ نرخ رد شدن محصول را نشان می‌دهد. QRP نقطه کاهش کیفیت محصولات را نشان می‌دهد که $0 < QRP < 1$. همان‌طوری که در شکل (۴) آورده شده، کیفیت یک محصول در گذر زمان به‌عنوان یک تابع پیوسته کاهش یابد.



شکل (۴): تابع کیفیت محصول

۳-۱. محدودیت‌های مربوط به تعداد وسایل‌نقلیه موجود در انبارهای انتخاب شده

$$\sum_m \sum_l \sum_j x_{mlkijs} \le Nu_{ik} \quad \forall k,i,s \qquad (۱۱)$$

$$\sum_m \sum_l \sum_j x_{mlkjis} \le Nu_{ik} \quad \forall k,i,s \qquad (۱۲)$$

محدودیت (۱۱) نشان می‌دهد که تعداد وسایل‌نقلیه خروجی از انبار باید از تعداد بالقوه کم‌تر باشد. محدودیت (۱۲) تعداد وسایل‌نقلیه ورودی از انبار باید از تعداد بالقوه کم‌تر باشد.

۳-۲. محدودیت‌های مربوط به تخصیص جریان‌های ورودی و خروجی

$$\sum_m \sum_l \sum_k \sum_v x_{mlkjvs} = 1 \quad \forall j,s \qquad (۱۳)$$

$$\sum_m \sum_l \sum_k \sum_v x_{mlkvjs} = 1 \quad \forall j,s \qquad (۱۴)$$

$$\sum_m \sum_l \sum_v x_{mlkv'vs} = \sum_m \sum_l \sum_v x_{mlkvv's} \quad \forall k,v',s \qquad (۱۵)$$

محدودیت (۱۳) و محدودیت (۱۴) باید تعداد خروجی و ورودی هر گره مشتری برابر یک باشد. محدودیت (۱۵) جریان ورودی و خروجی برای هر وسیله‌نقلیه را مشخص می‌کند.

۳-۳. محدودیت‌های جریان‌های محصولات و ظرفیت انبارها

$$lc_{kijs} \le C_k \quad \forall k,i,j,s \qquad (۱۶)$$

$$lc_{kvv's} \le (C_k - q_k) \sum_m \sum_l x_{mlkvv's} \quad \forall k,v,v',s \qquad (۱۷)$$

$$\sum_k \sum_v lc_{kvjs} - \sum_k \sum_v lc_{kjvs} = q_j \quad \forall j,s \qquad (۱۸)$$

$$q_j \sum_m \sum_l x_{mlkvjs} \le lc_{kvjs} \quad \forall v,j,k,s \qquad (۱۹)$$

$$\sum_j q_j U_{ijs} \le y_i B_i \quad \forall i,s \qquad (۲۰)$$

محدودیت (۱۶) کمتر بودن مقدار بار خروجی از انبار از ظرفیت وسیله‌نقلیه را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۷) نشان می‌دهد که اگر گره‌ای قرار است ملاقات شود بار حمل شده به گره مقصد باید حداکثر به مقدار اختلاف ظرفیت و تقاضای گره قبل باشد. محدودیت (۱۸) نشان‌دهنده برابری اختلاف بار ورودی و خروجی به یک گره با تقاضای آن است. محدودیت (۱۹) نشان می‌دهد که نیاز هر مشتری باید از باری که به سمت آن می‌آید کم‌تر باشد. محدودیت (۲۰) رعایت ظرفیت هر انبار را نشان می‌دهد.

۳-۴. محدودیت‌های تخصیص مشتریان به انبارها

$$\sum_m \sum_l \sum_v x_{mlkvjs} + \sum_m \sum_l \sum_v x_{mlkivs} \le 1 + U_{ijs} \quad \forall i,j,k,s \qquad (۲۱)$$

$$\sum_i U_{ijs} \le 1 \quad \forall j,s \qquad (۲۲)$$

محدودیت (۲۱) نشان می‌دهد که اگر یک مشتری به انبار تخصیص یابد آن‌گاه مشتری بعدی متصل هم باید به همان انبار تخصیص یابد. محدودیت (۲۲) الزام تخصیص هر مشتری فقط به یک انبار را نشان می‌دهد.

۳-۵. محدودیت‌های مربوط به تعیین بازه‌های زمانی، پنجره زمانی و زودکرد و دیرکرد

$$dt_{iks} \ge dt_{jks} + \sum_m \sum_l \left(\frac{D_{mji}}{v_{mlkji}}\right) x_{mlkjis} \quad \forall k,i,j,s \qquad (۲۳)$$

$$dt_{vks} + \sum_m \sum_l \left(\frac{D_{mvj}}{v_{mlkvj}}\right) \ge e''_j \sum_m \sum_l x_{mlkvjs} \quad \forall k,i,j,s \qquad (۲۴)$$

$$dt_{vks} + \sum_m \sum_l \left(\frac{D_{mvj}}{v_{mlkvj}}\right) \leq l''_j + M(1 - \sum_m \sum_l x_{mlkvjs}) \quad \forall k, v, j, s \tag{۲۵}$$

$$\sigma_{kjs} \geq e'_j \sum_m \sum_l x_{mlkjvs} - dt_{vks} - \sum_m \sum_l \frac{D_{mvj}}{v_{mlkvj}} \quad \forall v, k, j, s \tag{۲۶}$$

$$\mu_{kjs} \geq dt_{vks} + \sum_m \sum_l \left(\frac{D_{mvj}}{v_{mlkvj}} - l'_j\right) x_{mlkvjs} \quad \forall v, k, j, s \tag{۲۷}$$

$$dt_{vks} + \sum_m \sum_l \frac{D_{mvj}}{v_{mlkvj}} x_{mlkvjs} + \sigma_{kjs} + ST_j \leq M\left(1 - \sum_m \sum_l x_{mlkvjs}\right) + dt_{jks} \quad \forall v, k, j, s \tag{۲۸}$$

$$dt_{jks} - \tau_{kjs} + \sum_m \sum_l \frac{D_{mji}}{v_{mlkji}} x_{mlkjis} \leq M\left(1 - \sum_m \sum_l x_{mlkjis}\right) \quad \forall v, k, j, s \tag{۲۹}$$

$$dt_{vks} - M(1 - x_{mlkvv's}) \leq UP_{lvv'} \quad \forall m, l, k, v, v', s \tag{۳۰}$$

$$dt_{vks} - UP_{l-1,vv'} x_{mlkvv's} \geq 0 \quad \forall m, l, k, v, v', s \tag{۳۱}$$

محدودیت (۲۳) زمان رسیدن به هر انبار را مشخص می‌کند. محدودیت (۲۴) و (۲۵) نشان می‌دهند که پنجره زمانی هر مشتری باید رعایت شود و بین بالاترین و پایین‌ترین بازه زمانی قرار گیرد. محدودیت (۲۶) و (۲۷) مدت زمان انتظار و تأخیر وسیله در هر گره مشتری براساس حد پایین و بالای پنجره زمانی را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۸) زمان عزیمت از هر گره را مشخص می‌کند. محدودیت (۲۹) مدت زمان کلی که وسیله‌نقلیه در راه است را مشخص می‌کند. محدودیت (۳۰) و (۳۱) بازه زمانی حرکت وسایل‌نقلیه را مشخص می‌کنند.

۳-۶. محدودیت مربوط به کیفیت محصولات فسادپذیر

$$g_{vs} \leq \frac{1 - \frac{AT_{vs}}{SL}}{1 - QRP} \quad \forall v, s \tag{۳۲}$$

$$g_{vs} \leq 1 \quad \forall v, s \tag{۳۳}$$

محدودیت (۳۲) و (۳۳) محدودیت مربوط به محاسبه کیفیت محصولات بوده که خطی‌سازی تابع غیرخطی (۱۰) می‌باشد.

$$x_{mlkvv's}, U_{ijs}, y_i \in \{0,1\} \tag{۳۴}$$

$$\sigma_{kjs}, \mu_{kjs}, \tau_{kjs}, dt_{vks}, lc_{kvv's}, g_{vs} \geq 0 \tag{۳۵}$$

محدودیت‌های (۳۴) و (۳۵) نیز نوع متغیرها را نشان می‌دهند.

۴. روش حل

مدل ارائه‌شده در این مقاله دارای دو تابع هدف بوده که برای حل مساله دو هدفه از روش وزن‌دهی استفاده شده‌است. این روش به طور گسترده برای مدل‌سازی چندهدفه مورد استفاده قرار می‌گیرد (برای نمونه [۲۶] و [۲۷]). با تخصیص مقادیر ضریب وزن برای اهداف مختلف، این روش می‌تواند دو توابع هدف را به یک هدف واحد متصل کند و مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو را به‌دست آورد. بنابراین هر دو تابع هدف در یک تابع هدف که هر یک از اهداف نرمال سازی شده‌اند با وزن‌های متفاوت نشان داده می‌شوند. تابع هدف حاصل از روش وزن‌دهی به‌صورت $Min\ Z = w.\overline{z_1} - (1-w).\overline{z_2}$ می‌باشد. $\overline{z_1}$ نشان‌دهنده تابع نرمال شده‌ی هدف مربوط به هزینه‌های تأسیس و هزینه‌های عملیاتی و $\overline{z_2}$ تابع هدف نرمال شده‌ی مربوط به ارتقای کیفیت محصولات در زمان تحویل به مشتری است. هر ضریب وزنی w مقداری بین ۰ و ۱ دارد و میزان اهمیت توابع را برای تصمیم‌گیرنده نشان می‌دهد. برای مثال در صورتی‌که سلامت کالا و رضایت مشتری در اولویت تصمیم‌گیری باشد، مقدار ضریب وزنی تابع هدف کیفیت محصولات مقداری بیشتر از ضریب تابع هدف هزینه دارد. مساله مکان‌یابی مسیریابی دارای ادغام دو سطح تصمیم‌گیری است. در سطح استراتژیک، تصمیمات مربوط به احداث انبارها گرفته می‌شود و در سطح تاکتیکی مسئله مسیریابی و زمانبندی حرکت بررسی می‌شود. برای حل و بررسی مدل ارائه شده شبکه‌ی چندگانه شامل ۱۰ گره ساخته شده است. در این راستا پارامترهای ورودی براساس جدول (۳) تولید شده‌اند.

جدول (۳): پارامترهای ورودی تولید شده برای مسئله‌ی مکان‌یابی-مسیریابی ارائه شده

ثابت مربوط به شتاب	$alpha$	۰,۱	تعداد وسایل نقلیه نوع k در انبار i	Nu_{ik}	[۲ ۳، ۳ ۳]
جریمه حد پایین پنجره زمانی	$pLtime$	۱۰۰	تقاضای گره v	q_v	[۱۰۰،۵۰۰]
جریمه حد بالا پنجره زمانی	$pUtime$	۲۰۰	زمان سرویس دهی به هر مشتری j	ST_j	[۲۰،۵۰]
هزینه سوخت وسیله k	fc_k	[۱۰۰،۳۰۰]	ظرفیت انبار i	B_i	۲۰۰۰،۱۲۰۰
هزینه آلودگی وسیله k	ep_k	[۵۰،۱۵۰]	حد پایین زمان شروع سرویس‌دهی	e'_j	[۲۰۴۰]
هزینه اولیه تاسیس انبار i	f_i	[۸۰۰،۱۰۰۰]	حد بالای زمان شروع سرویس‌دهی مشتری j	l'_j	[۶۰،۱۵۰]
ظرفیت وسیله نقلیه k	B_i	۸۰۰،۱۰۰۰	پایین‌ترین حد شروع سرویس‌دهی مشتری j	e''_j	[۱۰،۵۰]
هزینه اولیه وسیله نقلیه k	PB_k	۲۴۰۰۰،۵۰۰۰۰	بالاترین حد شروع سرویس‌دهی مشتری j	l''_j	[۳۰۰،۵۰۰]
هزینه ثابت راننده k	SL_k	۲۰۰۰،۱۰۰۰۰	فاصله بین گره‌ها برای حرکت از مسیر j	$D_{mvv'}$	[۱۰۰،۱۰۰۰]
وزن خالص وسیله نقلیه k	W_k	۲۰۰۰،۱۱۰۰۰	حد بالای بازه زمانی حرکت از v به v'	$UP_{lvv'}$	[۲۰،۴۰۰]
ثابت وسیله نقلیه k	β_k	۱۰،۲۰	سرعت وسیله k بین دو گره در بازه l از یال m	$v_{mlkvv'}$	[۴۰،۱۲۰]
تعداد سناریوها	se	۴	احتمال رخداد هر سناریو s	ξ_s	۰,۵،۰,۳۵،۰,۱،۰,۰۵
عمر مفید محصولات	SL	۲۰۰	پارامتر QRP	QRP	۰,۵

مدل ارائه داده شده با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز کد نویسی و حل شده است. در ادامه به بررسی نتایج حاصل از مدل با تمرکز بر نوآوری‌های مطرح شده می‌پردازیم. در ابتدا به بررسی وجود یال‌های موازی و استفاده از شبکه‌ی چندگانه در مدل پرداخته شده است. در این راستا در شبکه‌ی چندگانه برخی از یال‌های موازی را به تصادف حذف کرده که شبکه تنها یک یال موازی بین دو مسیر داشته باشد و مدل را حل می کنیم. در این بررسی اوزان تابع هدف اول و دوم هر دو مساوی و برابر ۰,۵ فرض شده است. نتایج از حل مدل در دو حالت مختلف در شکل (۵) آورده شده است. فرض کنید بهبود ایجاد شده به واسطه‌ی استفاده از شبکه چندگانه با استفاده از معادله (۳۶) محاسبه شود.

$$Improvement(\%) = \frac{|Obj_S - Obj_M|}{Obj_S} \times 100 \qquad (۳۶)$$

که در آن داریم:

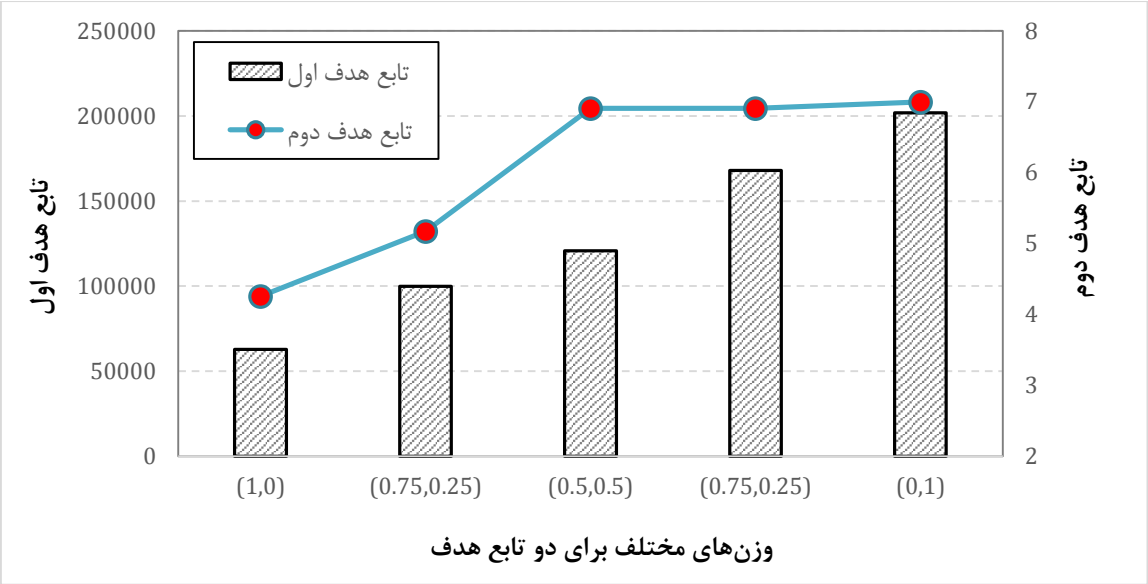
Obj_S مقدار تابع هدف در شبکه‌ی حمل‌ونقل ساده

Obj_M مقدار تابع هدف در شبکه‌ی حمل‌ونقل چندگانه

همان‌طور که از شکل نیز مشخص است استفاده از شبکه‌ی چندگانه در حدود ۱۶ درصد باعث بهبود کیفیت پاسخ مساله شده است. همان‌طور که در قبل ذکر شد، برای تبدیل دوتابع هدف به یک هدف کلی از روش وزن‌دهی استفاده شده است. طبیعتا با تغییر نسبت اوزان در تابع هدف مسئله، می توان پاسخ‌های مختلفی به دست آورد. برای این منظور تحلیل حساسیتی بر روی مقادیر تابع هدف اول و دوم با وزن‌های مختلف انجام شده است. شکل (۶) نتایج به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد.

به‌وضوح مشخص است که با افزایش مقدار وزن یک هدف تمرکز بهینه‌سازی بر روی آن هدف بیشتر خواهد شد و پاسخ بهتری به ازای آن هدف به‌دست می‌آید.

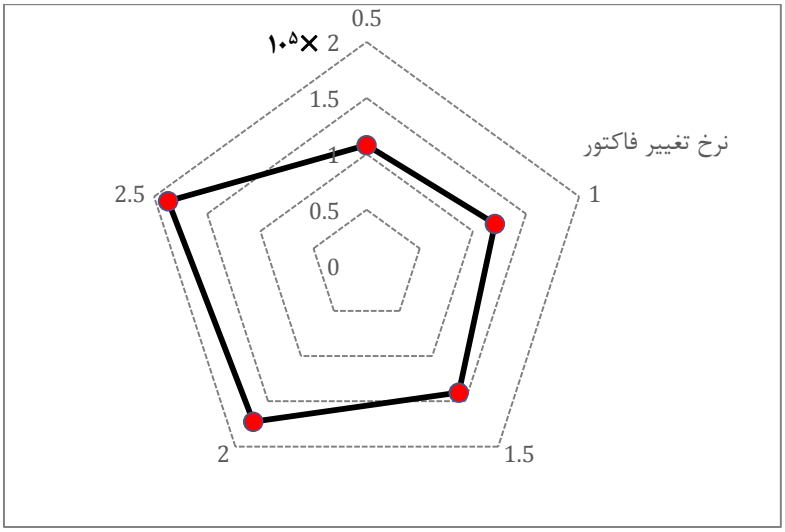
شکل (۵): ارزیابی تاثیر شبکه‌ی چندگانه در تابع هدف مسئله



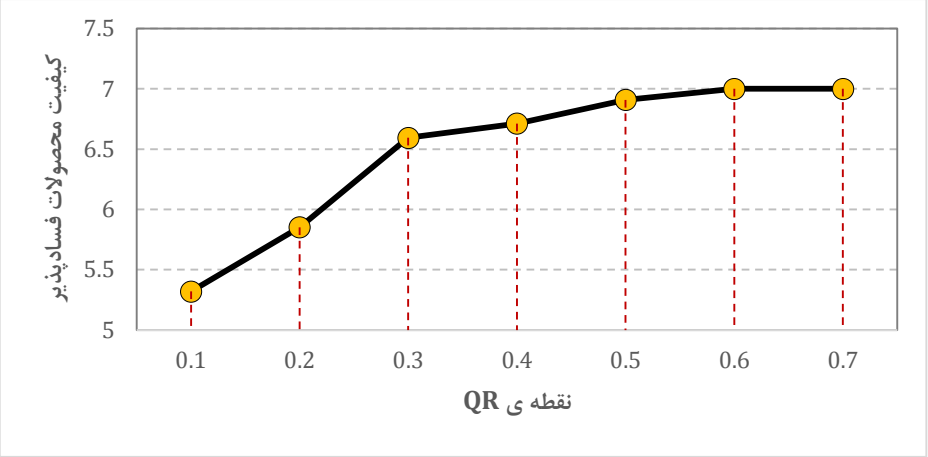
شکل (۶): مقادیر به‌دست‌آمده برای توابع تعریف شده به ازای اوزان مختلف

از نوآوری‌های دیگر مسئاله، که در بخش اول به آن اشاره شد در نظرگیری آلودگی‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های تحمیلی ناشی از آن در مدل می‌باشد. وسایل نقلیه در مدل مذکور می‌تواند به‌صورت همگن و ناهمگن لحاظ شود. در شکل (۷) مقدار هزینه‌ی ناشی از آلودگی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته شده است. بدین‌منظور هزینه‌ی ارائه شده در جدول (۳) با ضرایب مختلف در مدل لحاظ و حل شده است. شکل نشان می‌دهد تاثیر هزینه‌ی آلودگی در مقدار تابع هدف قابل چشم‌پوشی نبوده و کارشناسان و مدیران می‌بایست این به اهمیت این موضوع در مدل توجه داشته باشند.

در نهایت به بررسی تغییر نقطه‌ی کاهش کیفیت QR و تأثیر آن بر تابع هدف دوم پرداخته شده است. برای این منظور مدل ارائه شده با مقادیر مختلف QR حل و بررسی شده و نتایج در شکل (۸) آورده است. این نقطه وابسته به فسادپذیری محصول حمل شونده متفاوت خواهد بود. به این ترتیب که هرچه مواد غذایی فسادپذیرتر تلقی شود و کیفیت آن‌ها سریع‌تر با افزایش زمان کاهش یابد این نقطه به صفر نزدیک‌تر خواهد شد؛ و بالعکس. همان‌طور که در شکل (۸) نیز مشخص شده، هرچه محصول از QR بالاتری برخوردار باشد، مدل توانایی بیشتری در نگهداری کیفیت محصول داشته است. در این نمونه مثال اگر این مقدار از ۰٫۶ بیشتر لحاظ شود، تمامی محصولات با بهترین کیفیت به دست مشتری می‌رسد. با کاهش این مقدار، کیفیت محصولات رسیده به دست مشتری تحت الشعاع قرار می‌گیرد.



شکل (۷): تغییر مقدار تابع هدف به ازای مقادیر مختلف هزینه‌ی ناشی از آلودگی



شکل (۸): جابجایی نقطه کیفیت QR و تأثیر آن بر تابع هدف دوم

۵. پیشنهادات مدیریتی

با توجه به پیچیدگی موجود در ساختار شهری این امکان وجود دارد که بین دو نقطه از شبکه مسیرهای مختلف وجود داشته باشد. لحاظ کردن مسیرهای موازی برای حمل‌ونقل کالاهای به‌ویژه در مسیرهای درون‌شهری و حاشیه‌ی شهر در مدل‌های مسیریابی امری مهم و اساسی می‌باشد که می‌تواند هم هزینه‌های سیستم حمل‌ونقل را کاهش دهد و هم هزینه‌های ناشی از آلودگی‌های زیست‌محیطی و مصرف سوخت را تحت تأثیر قرار دهد. در این راستا لحاظ کردن ترافیک مختلف در زمان‌های مختلف روز برای هر یک از مسیرهای موازی بسیار حائز اهمیت است به طوریکه که وابسته به زمان آغاز سفر از یک نقطه مسیر انتخابی توسط مدل بهینه‌سازی متفاوت خواهد بود. نکته‌ی یاد شده برای تمامی مدل‌هایی که در آن زمان تأثیرگذار است، اهمیت بیشتری خواهد داشت.

در این مطالعه بر روی حمل‌ونقل کالاهای فسادپذیر تمرکز شده است که در آن افزایش زمان سفر و تأخیر در تحویل کالاها تأثیر بسزایی در کیفیت و احتمال خرید مشتری از محصول ارائه شده خواهد گذاشت. همان‌طور که پیشتر نیز عنوان شد با تغییر نقطه‌ی کیفیت QR می‌توان مدل را برای محصولات مختلف پیاده‌سازی و بررسی کرد. در نظرگیری اهداف عملیاتی و استراتژیک در حمل‌ونقل کالاهای در محیط درون شهری باعث کاراتر شدن مدل‌های این حوزه می‌شود. در این راستا مدل علاوه‌بر تصمیمات استراتژیک مانند تأسیس انبار تصمیمات عملیاتی مانند مسیریابی، فاکتورهای آلاینده شامل وزن، بار حمل شده در مسیر و تازگی محصولات ارسالی و غیره را به‌طور یکپارچه لحاظ می‌کند که این امر بر کیفیت پاسخ‌ها تأثیرگذار است. همچنین مدل مذکور قادر است چگونگی تخصیص مشتریان به انبارها، مسیریابی وسایل و سایر متغیرهای تصمیم مسأله را در حالتی که زنجیره‌ی عرضه با اختلال (از دست رفتن انبارها) نیز مواجه است را تعیین کند.

۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه به مدل‌سازی و حل یک مدل دو هدفه‌ی مکان‌یابی-مسیریابی وسایل نقلیه با درنظرگیری شاخص آلودگی و احتمال اختلال انبارها برای محصولات فسادپذیر پرداخته شده است. شبکه موردبررسی برای طراحی مسیر حرکت برای وسایل نقلیه به‌صورت چندگانه بوده است. در واقع و بین هر دو گره از شبکه بیش از یک مسیر با شاخص‌های مختلف که وابسته به زمان متغیر هستند لحاظ می‌گردد. به‌منظور درنظرگیری شرایط اختلال، از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای مدل‌سازی مسئله استفاده شده است. درواقع مدل لجستیکی سعی بر این دارد تا در سناریوهای مختلف اختلال، رویکردهای متفاوتی برای بهینه بودن سیستم حمل‌ونقل ارائه دهد. از آنجایی که مدل برای محصولات فسادپذیر مطرح شده، افزایش زمان بازدید مشتریان و زمان سفر در مسیریابی بر روی کیفیت محصولاتی که به‌دست مشتریان می‌رسد تأثیر می‌گذارد. این تأثیرگذاری بر مبنای تابع کیفیت محصول در مدل بررسی و لحاظ شده است. لازم به ذکر است که در شرایط اختلال تضمینی برای ارائه خدمت به تمام مشتریان وجود نداشته و در صورت تشخیص مدل برخی از مشتریان که انبار آن‌ها دچار شکست شده است، سرویس‌دهی نمی‌شوند؛ و نیاز سایر مشتریان با انبارهای سالم دیگر تأمین می‌شود. پس از مدل‌سازی مسئله، مدل مذکور در نرم افزار بهینه‌سازی گمز کدنویسی و با استفاده از حل‌کننده‌ی CPLEX حل شده است. در ادامه پارامترهای مهم و کاربردی مسئله مورد تحلیل حساسیت قرار گرفته و نتایج حاصل از آن گزارش و پیشنهادات مدیریتی تبیین شده است. اگرچه سعی شده مدل ارائه شده به طور کامل تمامی زوایای یک لجستیک شهری را لحاظ کند، ولیکن همچنان قابل بهبود می‌باشد. چندی از پیشنهادات برای مطالعات آتی عبارتند از:

- این امکان لحاظ شود که شکست بر روی بخشی از ظرفیت انبار تأثیر گذارد و تمامی انبار یه یکباره خارج از دسترس نشود.
- بررسی تعامل یا رقابت بین شرکتها در زمانی که بیش از یک شرکت در توزیع کالاها دخیل باشند.
- ارائه‌ی رویکرد حل کارا مانند روش‌های ابتکاری و فرابتکاری برای حل مدل در ابعاد بزرگتر.

مراجع

[1] Setak, M., Feizizadeh, F., Tikani, H., Ardakani, E. S. (2019). "A bi-level stochastic optimization model for reliable supply chain in competitive environments: Hybridizing exact method and genetic algorithm", *Applied Mathematical Modelling*, 75: 310-332.

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

[3] Wu, T.H., Low, C., Bai, J.W. (2002). "Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems", *Computers & Operations Research*, 29(10): 1393-1415.

[4] Yaghoubi, A., Akrami, F. (2019). "Proposing a new model for location-routing problem of perishable raw material suppliers with using meta-heuristic algorithms", *Heliyon*, 5(12): e03020.

[5] Wang, Z., Leng, L., Wang, S., Li, G., Zhao, Y. (2020). "A Hyperheuristic Approach for Location-Routing Problem of Cold Chain Logistics considering Fuel Consumption", *Computational Intelligence and Neuroscience*.

[6] Solomon, Marius M. (1987). "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints". *Operations research*, 35.2: 254-265.

[7] Ponboon, S., Qureshi, A.G., Taniguchi, E. (2016). "Evaluation of cost structure and impact of parameters in location-routing problem with time windows", *Transportation Research Procedia*, 12: 213-226.

[8] Ponboon, S., Qureshi, A.G., Taniguchi, E. (2016). "Branch-and-price algorithm for the location-routing problem with time windows". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 86: 1-19.

[9] Tikani, H., Setak, M. (2019). "Ambulance routing in disaster response scenario considering different types of ambulances and semi soft time windows", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 12(1): 95-128.

[10] Garaix, T., Artigues, C., Feillet, D., Josselin, D. (2010). "Vehicle routing problems with alternative paths: An application to on-demand transportation", *European Journal of Operational Research*, 204(1): 62-75.

[11] Lai, D. S., Demirag, O. C., Leung, J. M. (2016). "A tabu search heuristic for the heterogeneous vehicle routing problem on a multigraph", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 86: 32-52.

[12] Reinhardt, L. B., Jepsen, M. K., Pisinger, D. (2016). "The edge set cost of the vehicle routing problem with time windows", Transportation Science, 50(2): 694-707.

[13] Ticha, H. B., Absi, N., Feillet, D., Quilliot, A. (2017). "Empirical analysis for the VRPTW with a multigraph representation for the road network", *Computers & Operations Research*, 88, 103-116.

[14] Ticha, H. B., Absi, N., Feillet, D., Quilliot, A. (2019). "Multigraph modeling and adaptive large neighborhood search for the vehicle routing problem with time windows", *Computers & Operations Research*, 104:113-126.

[15] Setak, M., Habibi, M., Karimi, H. and Abedzadeh, M. (2015). "A time-dependent vehicle routing problem in multigraph with FIFO property", *Journal of Manufacturing Systems*, 35: 37-45.

[16] Setak, M., Shakeri, Z., Patoghi, A. (2017). "A Time Dependent Pollution Routing Problem in Multi-graph", *International Journal of Engineering-Transactions B: Applications*, 30(2): 234-242.

[17] Setak, M., Izadi, S., Tikani, H. (2017). "A time-dependent vehicle routing problem for disaster response phase in multi-graph-based network". *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 28(4): 377-387.

[18] Tikani, H., Setak, M. (2019). "Efficient solution algorithms for a time-critical reliable transportation problem in multigraph networks with FIFO property", *Applied Soft Computing*, 74: 504-528.

[19] Maden, W., Eglese, R., Black, D. (2010). "Vehicle routing and scheduling with time varying data: A case study", *Journal of the Operational Research Society*, 61: 515–522.

[20] Figliozzi, M. A. (2010). "Vehicle routing problem for emissions minimization", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2197: 1–7.

[21] Jabali, O., Van Woensel, T., de Kok, A. G. (2012). "Analysis of travel times and CO2 emissions in time-dependent vehicle routing". *Production and Operations Management*, 21: 1060-1074.

[22] Musavi, M., Bozorgi-Amiri, A. (2017). "A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain", *Computers & Industrial Engineering*, 113, 766-778.

[23] Ahmadi-Javid, A., Seddighi, A. H. (2013). "A location-routing problem with disruption risk". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 53, 63-82.

[24] Zhang, Y., Qi, M., Lin, W.H., Miao, L. (2015). "A metaheuristic approach to the reliable location routing problem under disruptions". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 83: 90-110.

[25] Xie, W., Ouyang, Y. and Wong, S.C. (2015). "Reliable location-routing design under probabilistic facility disruptions", *Transportation Science*, 50(3): 1128-1138.

[26] Karimi, H., Setak, M. (2018). "A bi-objective incomplete hub location-routing problem with flow shipment scheduling". *Applied Mathematical Modelling*, 57: 406-431.

[27] Ardakani, E. S., Seifbarghy, M., Tikani, H., Daneshgar, S. (2020). Designing a multi-period production-distribution system considering social responsibility aspects and failure modes. Sustainable Production and Consumption.

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Spring and Summer 2020, Volume 8., No. 16., pp. 171-183
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/ier.2020.21281.1953

Selected paper of the 16th International Conference on Industrial Engineering

Modeling and Solving the Locating-Routing Problem for Perishable Products in Multigraphs Considering Vehicle Pollution and Warehouses Failure

H. Tikani[1], M. Setak[2*], Z. Shakeri Kebria[3]

[1,2] Department of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
[3] Department of Industrial Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 15 March 2020
Accepted 22 April 2020

***Keywords*:**

Location-routing model
Multigraph network
Two-stage stochastic model
Failure
Vehicle pollution

ABSTRACT

The expansion of urban infrastructure and the development of urbanization, on the one hand, and the increasing demand and growth of distribution companies in urban and inter-urban environments on the other hand, have led to complexities in logistics and good transport. In this regard, many companies and factories produce and distribute food products that their qualities decrease by increasing the duration of distribution. In this study, we present and investigate the locating-routing model in multigraphs where parallel paths have different traffic congestions according to the time of the day. The proposed model tends to reduce the costs of locating and logistics in addition to reduce pollution generated by vehicles and maximize the quality of food products. In order to approach the model to real conditions, the problem is modeled under uncertain conditions and warehouses failure is possible in the transport network. In the following, the proposed model is solved and examined. The results show that the use of multigraph representation not only reduces transportation costs and environmental impacts but also enhances the quality, novelty of shipped products, and helps to design an efficient logistic network for perishable products.

* Corresponding author. M. Setak
Tel.: 021-84063373; E-mail address: setak@kntu.ac.ir