E-ISSN: 2676-6159 | P-ISSN: 2538-5079

Journal of Decisions and Operations Research

www.journal-dmor.ir

J. Decis. Oper. Res. Vol. 8, No. 4 (2023) 917–930.

Paper Type: Original Article

Optimization of Distribution Risk of Hazardous Materials in the Production Routing Problem

Amin Farahbakhsh[1], Amirsaman Kheirkhah[1,*]

[1] *Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University of Hamedan, Hamedan, Iran; a.farahbakhsh@eng.basu.ac.ir; kheirkhah@basu.ac.ir.*

Citation:

Farahbakhsh, A., & Kheirkhah, A. (2023). Optimization of distribution risk of hazardous materials in the production routing problem. *Journal of decisions and operations research, 8*(4), 917-930.

Received: 10/04/2022 Reviewed: 12/05/2022 Revised: 09/06/2022 Accepted: 01/07/2022

Abstract

Purpose: The production routing problem is created by combining the two problems of lot sizing and vehicle routing. Previous research has examined the effectiveness of this combination in reducing costs. In this paper, the production routing problem is considered with the aim of minimizing the risk of production and distribution of hazardous materials. Attention to social and environmental criteria related to sustainability is being increased by researchers today. Hazardous materials are harmful to human health and the environment. Accidents related to these materials often have far-reaching adverse consequences. Risk is a danger measurement criterion for operations related to these materials.

Methodology: The problem is modeled as a mixed integer program. The risk function in the proposed model is nonlinear and depends on the load of the machine, the population risk, and the type of hazardous material. Given that solving the mathematical model with the nonlinear objective function is more difficult, this function is approximated by a piecewise linear function.

Findings: In this research, 8 standard instances have been used to evaluate and solve the model and compare the two nonlinear and linear models. The results show that by using the approximate model, a better answer can be achieved at the same time. Through sensitivity analysis, the effect of changes to production capacity and warehouses on risk has also been looked into.

Originality/Value: This research proposed the production routing problem for hazardous materials according to sustainability criteria using a nonlinear mathematical model and uses a piecewise linear approximation to solve the model.

Keywords: Sustainability, Piecewise linear function, Risk, Inventory routing problem, HAZMAT.

Corresponding Author: kheirkhah@basu.ac.ir

Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Journal of Decisions and Operations Research

تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات

دوره ۸، شماره (۴)، (۱۴۰۲)، ۹۳۰-۹۱۷

www.journal-dmor.ir

نوع مقاله: پژوهشی

بهینه‌سازی ریسک توزیع مواد خطرناک در مساله مسیریابی تولید

امین فرح بخش[۱]، امیرسامان خیرخواه[۱,*]

[۱]گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

چکیده

هدف: مساله مسیریابی تولید از ترکیب دو مساله تعیین اندازه انباشته و مسیریابی وسایل نقلیه ایجاد شده است. در پژوهش‌های گذشته اثربخشی این ترکیب در کاهش هزینه‌ها بررسی شده است. در این مقاله، مساله مسیریابی تولید با هدف حداقل‌سازی ریسک تولید و توزیع مواد خطرناک، در نظر گرفته شده است. توجه به معیارهای اجتماعی و زیست‌محیطی مربوط به پایداری، امروزه توسط پژوهشگران بیش‌ازپیش مدنظر قرار دارد. مواد خطرناک، موادی مضر برای سلامت انسان‌ها و محیط‌زیست هستند و معمولا حوادث مرتبط با این مواد، پیامدهای ناگوار گسترده‌ای دارد. ریسک معیاری برای سنجش میزان خطرناک بودن عملیات مرتبط با این مواد است.

روش‌شناسی پژوهش: مساله موردنظر به شکل یک برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح مدل‌سازی شده است. تابع ریسک در مدل پیشنهادی، غیرخطی بوده و وابسته به میزان بارگذاری ماشین، جمعیت در معرض خطر و نوع ماده خطرناک بیان گردیده است. با توجه به این‌که غیرخطی بودن تابع هدف بر دشواری حل مدل بهینه‌سازی می‌افزاید، این تابع با یک تابع تکه‌خطی[۱] تقریب زده شده است.

یافته‌ها: در این پژوهش از ۸ نمونه استاندارد برای بررسی و حل مدل و مقایسه دو حالت غیرخطی و خطی استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که با استفاده از مدل تقریبی می‌توان در زمان یکسان به جواب بهتری دست یافت. هم‌چنین از طریق تحلیل حساسیت تاثیر تغییر ظرفیت تولید و انبارها بر ریسک بررسی شده است.

اصالت/ارزش‌افزوده علمی: این پژوهش مساله مسیریابی تولید را برای مواد خطرناک با توجه به معیارهای پایداری با استفاده از یک مدل غیرخطی مطرح می‌کند و از یک تقریب خطی برای حل مدل موردنظر استفاده می‌کند.

کلیدواژه‌ها: پایداری، تابع تکه‌خطی، ریسک، مسیریابی تولید، مواد خطرناک.

۱- مقدمه

مساله مسیریابی تولید از ترکیب دو مساله کلاسیک مهم تعیین اندازه انباشته و مسیریابی وسایل نقلیه ایجاد شده است؛ این مساله به بهینه سازی هم‌زمان تصمیمات مربوط به برنامه‌ریزی تولید، کنترل موجودی و مسیریابی توزیع می‌پردازد [1]. این مساله به‌صورت کلی مساله‌ای جامع نسبت به مساله مسیریابی موجودی است [2]. مساله مسیریابی تولید به‌صورت عملی مرتبط با مساله مدیریت موجودی فروشنده است که در آن تامین‌کننده کنترل موجودی خرده‌فروش و تصمیمات مربوط به مدیریت موجودی برای هر خرده‌فروش را بر عهده دارد. در این مسایل تصمیم‌گیری به‌صورت متمرکز در سطح زنجیره‌تامین انجام می‌گیرد [3]. تمرکز تصمیم‌گیری به این معنی است که یک

[1] Piecewise linear approximation

* نویسنده مسئول

kheirkhah@basu.ac.ir

تصمیم‌گیرنده به‌صورت متمرکز در مورد تصمیمات موجودی و توزیع همه اعضای زنجیره‌تامین تصمیم‌گیری می‌کند. این هم‌زمانی و تمرکز تصمیمات مربوط به کنترل موجودی، مسیریابی و تولید در زنجیره‌تامین باعث کاهش هزینه‌ها به اندازه ۳% الی ۲۰% می‌گردد [4]. مساله مسیریابی تولید در حالت کلاسیک دارای یک کارخانه تولید مواد و کالاها است که محصولات خود را منطبق بر تقاضای مشتریان برای آن ها ارسال می‌کند. این مساله عمدتا به‌صورت دوره‌ای مطرح‌شده و در حالت کلی به سوال‌هایی از قبیل ۱- در هر دوره چه میزان محصول تولید گردد؟، ۲- در هر دوره به تقاضای کدام‌یک از مشتریان پاسخ داده شود؟ و ۳- مسیر بهینه انتقال مواد به مشتریان چگونه می‌تواند باشد؟ پاسخ می‌دهد [3].

پژوهش‌های علمی به‌منظور پیاده‌سازی و به‌کارگیری در شرایط عملی و واقعی صورت می‌گیرند. به‌همین منظور عمدتا پژوهش‌ها هر یک به‌نحوی سعی در نزدیک کردن شرایط مساله به شرایط واقعی دارند. یکی از این موارد در نظر گرفتن شرایط و تاثیرات مربوط به نوع مواد و کالاها می‌باشد. از آن‌جا که هر یک از مواد و کالاهایی که تولید و توزیع می‌شوند دارای شرایط و ویژگی‌های خاص خود می‌باشند، بنابراین نمی‌توان یک مساله را برای هر نوع کالایی پیاده‌سازی کرد و باید مساله منطبق بر ویژگی‌های مواد موردنظر مطرح گردد [5]. یکی از انواع مواد و کالاهای با شرایط خاص مواد و کالاهای خطرناک می‌باشند. در واقع مهم‌ترین نوع مواد و کالاها، مواد و کالاهای خطرناک هستند [6]. ازجمله این مواد و کالاهای خطرناک می‌توان به مواد سوختی، پتروشیمی، رادیواکتیو و شیمیایی اشاره کرد. مهم‌ترین نگرانی در حوزه مواد خطرناک، نگرانی‌های ایمنی، امنیتی و زیست‌محیطی است که این مواد را در زمره مواد موردتوجه دولت‌ها و سازمان‌های مربوطه قرار داده است [7]. خطرات جانی، مالی و زیست‌محیطی این مواد در اثر انفجار، تاخیر، انتشار در محیط و از دست‌رفتن به‌حدی است که تعریف مساله بدون در نظر گرفتن ریسک مربوطه توانایی بیان درست مسایل این حوزه را ندارد [3]. مواد خطرناک از طرق مختلفی مانند جاده، ریل، لوله و دریا می‌تواند توزیع گردد که هریک از این موارد نیازمند ارزیابی و مدل‌سازی ریسک مختص به‌خود هستند؛ هم‌چنین مهم‌ترین نوع توزیع مواد خطرناک، حمل‌ونقل جاده‌ای است [7]. جایگاه مساله توزیع مواد خطرناک در بین پژوهشگران به‌اندازه‌ای است که در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱٦ نزدیک به ۳۰۰ مقاله در مجلات معتبر دنیا در این زمینه منتشر شده است و دارای یک روند صعودی بوده است [7]. با وجود این توجهات از سوی پژوهشگران در این حوزه اما به‌ندرت مساله مسیریابی تولید برای مواد خطرناک مطرح شده است. پیچیدگی مساله و تاثیرات متقابل دو مساله مسیریابی تولید و توزیع مواد خطرناک باعث می‌شود که بیان این مسایل به‌آسانی صورت نگیرد. تصمیمات مساله مسیریابی تولید نیز مانند دیگر مسایل تحت تاثیر شرایط و خصوصیات مواد و کالاها هستند. بررسی این تاثیرات هم برای پژوهشگران و هم در عمل برای مدیران مفید و جالب‌توجه است. ریسک بیان‌شده در این مساله اشاره به خطرات ناشی از انفجار و انتشار مواد خطرناک در محیط دارد، لذا با توجه به خطرات زیان‌بار مربوطه، نحوه برخورد با ریسک در این مساله به‌نحوی است که ریسک به حداقل ممکن کاهش یابد. نحوه تحلیل و ارزیابی ریسک عاملی تاثیرگذار در بیان مساله است که هرچقدر دقیق‌تر و نزدیک به واقعیت صورت پذیرد، می‌تواند در اتخاذ تصمیمات مربوطه به مساله نمود بهتری داشته باشد. هم‌چنین نحوه مدل‌سازی ریسک مربوط به توزیع مواد خطرناک نیازمند نگرشی خاص در مساله مسیریابی تولید است که بتواند با حفظ ساختار اصلی مساله مسیریابی تولید، برآورد دقیقی از ریسک توزیع مواد خطرناک را نیز مدنظر قرار دهد.

این پژوهش مساله مسیریابی تولید را برای مواد خطرناک با توجه به شرایط این مواد و با در نظر گرفتن ریسک توزیع برای اولین‌بار مطرح کرده است. تابع هدف مساله که به دنبال کاهش ریسک مربوط به توزیع مواد خطرناک است با رویکردی جدید منطبق بر مساله مسیریابی تولید به‌صورت غیرخطی مدل‌سازی شده است. ارزیابی ریسک در این پژوهش وابسته به میزان بارگذاری ماشین، جمعیت در معرض خطر و نوع ماده خطرناک بیان گردیده است. هم‌چنین با استفاده از یک تقریب تکه‌خطی مدل به‌صورت عدد صحیح مختلط در می‌آید و نتایج حل در دو حالت خطی و غیرخطی به‌دست آمده و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در بخش ۲ ادبیات موضوع بررسی‌شده بیان می‌گردد. بخش ۳ به بیان مدل ریاضی مساله پرداخته و خطی‌سازی مدل ریاضی در بخش ٤ ارایه می‌گردد. نتایج حاصل از حل مدل و تقریب خطی موردنظر در بخش ٥ بیان شده است. بخش ٦ به تحلیل حساسیت مربوط به تاثیر مواد خطرناک بر مساله مسیریابی تولید اختصاص داده شده است. نهایتا، در بخش ۷، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی ارایه شده است.

۲- پیشینه پژوهش

مساله حمل‌ونقل یک مساله مهم برنامه‌ریزی خطی ساختاریافته شبکه‌ای است که در زمینه‌های مختلف توزیع مواد و کالاها به‌وجود می‌آید و موردتوجه زیاد پژوهشگران در ادبیات قرار گرفته است [8]. حمل‌ونقل مواد خطرناک، اگرچه ممکن است در میان دسته‌بندی کلی مسایل

فرایخش و خیرخواه / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲، صفحه: ۹۳۰-۹۱۷

حمل‌ونقل بار طبقه‌بندی شود، اما آن‌چه که محموله‌های مواد خطرناک را از حمل‌ونقل مواد دیگر متمایز می‌کند، خطر مرتبط با رهاسازی تصادفی مواد خطرناک در حین حمل‌ونقل است [9]. مواد خطرناک را می‌توان از طریق جاده، راه‌آهن، دریا، هوا و خط لوله انتقال داد. در هر یک از این حالت‌های حمل‌ونقل، ریسک مربوط به انتقال، به‌وسیله روش خاصی ارزیابی و مدل‌سازی می‌گردد. مهم‌ترین حالت برای توزیع مواد خطرناک، حمل‌ونقل جاده‌ای است [7]. اولین رویکردها برای بهینه‌سازی روند حمل‌ونقل مواد خطرناک مربوط به دهه ۱۹۷۰ است. کالکار و بروکس در سال ۱۹۷۸ از اولین کسانی بودند که یک چهارچوب چندبعدی برای تجزیه‌وتحلیل تصمیم در جهت بهبود پشتیبانی از حمل‌ونقل مواد خطرناک پیشنهاد دادند [10]. بعد از آن، مساله توزیع مواد خطرناک موردتوجه روزافزون قرار گرفت و جریان انجام پژوهش‌ها در این زمینه افزایش یافت. ارزیابی ریسک و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل مواد خطرناک دو زمینه اصلی پژوهشی در حمل‌ونقل مواد خطرناک است [9]. برخی از پژوهش‌ها نیز به بررسی امدادرسانی بعد از رخداد حادثه پرداخته‌اند، ازجمله پژوهش پورقادری چوبار و همکاران در سال ۲۰۲۲ که مساله مسیریابی-مکان‌یابی امدادرسانی چند دستگاهی را تحت عدم قطعیت مطرح کردند [11].

در روند انجام پژوهش‌ها برای نزدیک کردن مساله به شرایط واقعی کارهای زیادی انجام شده است. به‌عنوان نمونه، بیان مساله مسیریابی تحت شبکه حسگر بی‌سیم در موارد مختلف یکی از موارد نزدیک کردن مساله به شرایط واقعی است [12]. هم‌چنین بیان مساله توزیع مواد خطرناک بر بستر یکی از مسایل پایه‌ای نیز یکی از موارد دیگر است. بر این اساس ارکات و همکاران [13] طبقه‌بندی ساده‌ای را برای جنبه‌های مختلف مساله مسیریابی مواد خطرناک شامل ارزیابی ریسک، مسیریابی، مکان‌یابی، مسیریابی ترکیبی و طراحی شبکه ارایه کرده و بر اساس انواع حالات حمل‌ونقل به بررسی پژوهش‌ها پرداختند. بیانکو و همکاران [14] یک طبقه جدید با عنوان سیاست‌های تعیین عوارض نیز علاوه بر چهار مورد قبل پیشنهاد دادند. مساله مسیریابی وسایل نقلیه ازجمله مسایلی است که در زمینه توزیع مواد خطرناک موردتوجه بیشتری قرار گرفته است. بولا و همکاران [15] توزیع مواد خطرناک را در مساله مسیریابی مواد خطرناک مطرح کردند. در این پژوهش، تابع هدف مساله کاهش ریسک مربوط به توزیع مواد خطرناک است. هدف مساله به‌صورت غیرخطی و وابسته به میزان بارگذاری ماشین و میزان جمعیت در معرض خطر مطرح گردیده است. همین نویسندگان در سال ۲۰۱۹ توزیع مواد خطرناک را در مساله مسیریابی وسایل نقلیه با وجود اهداف متناقض کاهش ریسک و کاهش هزینه کل، به‌صورت دوهدفه مطرح کردند [16].

دو و همکاران [17] توزیع مواد خطرناک را در مساله مسیریابی وسایل نقلیه چنددپویی بیان کردند. نویسندگان مساله را به‌صورت یک برنامه‌ریزی فازی دوسطحی مطرح کردند. من و همکاران [18] توزیع مواد خطرناک را در مساله مسیریابی وسایل نقلیه ظرفیت‌دار با هدف کاهش ریسک مطرح کردند. در این پژوهش ارزیابی ریسک با استفاده از متغیرهای فازی مدنظر قرار گرفته است. هم‌چنین برای حل مدل از دو روش فرا ابتکاری الگوریتم ژنتیک و جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی استفاده شده است. ژو و همکاران [19] توزیع مواد خطرناک را در یک مساله مسیریابی وسایل نقلیه با چند دپو مطرح کردند. در این مساله مدل به‌صورت دوهدفه با اهداف کاهش ریسک و هزینه بیان گردیده است. طراحی شبکه توزیع نیز در زمینه توزیع مواد خطرناک بیش از سایر مسایل موردتوجه پژوهشگران است. فونتین و مینر [20] مساله طراحی شبکه توزیع مواد خطرناک را با دو هدف متضاد کاهش ریسک و کاهش هزینه کل مطرح کردند. مساله به‌صورت دوسطحی مطرح شده و توسط الگوریتم تجزیه بندرز حل شده است. ژنگ و همکاران [21] طراحی شبکه توزیع مواد خطرناک را با استفاده از برنامه‌ریزی دوسطحی مبتنی بر سیاست‌های تعیین عوارض ارایه دادند. مدل مساله با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید دوبل حل شده است. فونتین و همکاران [22] طراحی شبکه توزیع مواد خطرناک را به‌صورت برنامه‌ریزی دوسطحی با اهداف کاهش ریسک از طرف دولت و کاهش هزینه کل از طرف شرکت‌های حمل‌ونقل ارایه کردند. ارزیابی ریسک در این مساله مبتنی بر جمعیت در نظر گرفته شده است. محبتی و وینل [23] توزیع مواد خطرناک را در بستر طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته به‌نحوی مطرح کردند که مساله به تعیین مکان تیم‌های اضطراری امدادی در شبکه نیز به‌طور هم‌زمان می‌پردازد. بیان توزیع مواد خطرناک در مساله مسیریابی-مکان‌یابی با یک سیستم توزیع چندحالته و تقاضای غیرقطعی توسط ضیایی و جبارزاده [24] مطرح گردید. هم‌چنین طسوجی حسن‌پور و تولت [25] توزیع مواد خطرناک را در بستر مساله مسیریابی-مکان‌یابی وابسته به زمان، با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی و مسیرهای غیرقابل‌دسترس بیان کردند. بوالحسنی و همکاران [26] توزیع مواد خطرناک را در مساله مکان‌یابی-مسیریابی موجودی با در نظر گرفتن تقاضای کشسان و هم‌چنین بررسی سیستم‌های صف مطرح کردند. در سال ۲۰۲۲ توزیع مواد خطرناک در یک مساله مکان‌یابی-مسیریابی موجودی چندهدفه با رویکرد تاثیر ریسک توزیع بر معیارهای زیست‌محیطی توسط رهبری و همکاران مطرح گردید [27]. فنگ [28] مروری بر به‌کارگیری معیارهای زیست‌محیطی در مساله مسیریابی انجام داده است. معیارهای اجتماعی

ازجمله معیارهای مهم پایداری است که می‌تواند شرایط مساله را به شرایط واقعی نزدیک کند. سلامت‌بخش و همکاران [29] کمینه‌سازی هزینه وسایل نقلیه و بیشینه‌سازی میزان رضایت رانندگان وسایط نقلیه را از طریق بهینه‌سازی زمان سرویس‌دهی در حالت عدم قطعیت زمان‌های عبوری در نظر گرفتند.

یکی از مسایل پایه‌ای دیگر مساله مسیریابی تولید می‌باشد که از قبل موردتوجه پژوهشگران قرار داشته است. این مساله به تصمیم‌گیری هم‌زمان در مورد میزان تولید، میزان موجودی انبارها و میزان و مسیر توزیع مواد می‌پردازد. بیشتر مطالعات موجود در زمینه مساله مسیریابی تولید، سطح تصمیمات تاکتیکی را در نظر می‌گیرند [30]. ازجمله پژوهش‌هایی که در این زمینه توسط پژوهشگران صورت گرفته است می توان به مواردی که در ادامه عنوان می‌گردند اشاره کرد. لو و همکاران [31] مساله مسیریابی تولید را در یک زنجیره‌تامین دوسطحی توسط یک ناوگان حمل‌ونقل ناهمگن ارایه دادند. لی و همکاران [32] مساله مسیریابی تولید را به‌صورت چندمحصولی ارایه دادند که در این پژوهش توزیع محصولات به‌صورت برون‌سپاری مطرح شده است. زنجیره معکوس برگشت کالاهای معیوب از مشتریان به تامین‌کنندگان در مسایل مسیریابی وسایل نقلیه و مسیریابی موجودی با عنوان ارسال و برداشت مطرح شده است. این موضوع اولین‌بار در سال ۲۰۲۰ توسط همتی گلسفیدی و اکبری [33] جوکار در مساله مسیریابی تولید مطرح شده است. امامیان و همکاران [34] برای اولین‌بار در سال ۲۰۲۱ نشر آلاینده‌های زیست‌محیطی توسط کارخانه را نیز علاوه بر نشر مربوط به توزیع در مساله مسیریابی تولید مطرح کردند؛ هم‌چنین با در نظر گرفتن برگشت کالاهای معیوب از جانب مشتریان معیارهای اجتماعی را نیز مدنظر قرار دادند. شنمبرگ و همکاران [35] برای اولین‌بار مساله مسیریابی تولید را در دو سطح تامین و تقاضا برای مواد شیمیایی مطرح کردند. علاوه بر موارد فوق اطلاعات اضافه دیگری نیز در بررسی مدل‌های مربوط به مسیریابی تولید در پژوهش‌ها در نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن زمان سرویس وابسته به بارگذاری و تخلیه کالاها علاوه بر زمان ارسال توسط [36]، [37] در نظر گرفته شده است. زمان‌های بارگذاری و تخلیه در پژوهش‌ها به دو صورت در نظر گرفته شده است. یکی تعیین حداکثر زمان در دسترس برای تکمیل مسیرها [38] و نوع دیگر تعیین پنجره‌های زمانی برای مشتریان می باشد [37]. ارسال دسته‌ای محصولات توسط پژوهش گنجی و همکاران [39] مطرح شده است. لی و همکاران [40] مساله مسیریابی تولید را برای محصولات فسادپذیر در حالتی مطرح کردند که طول عمر محصولات تحت تاثیر زمان ارسال آن‌ها بوده و باید در کوتاه‌ترین زمان ممکن به مصرف‌کننده برسد؛ زیرا قیمت محصولات بر اساس عمر باقی‌مانده محصولات تعیین می‌شود. **جدول ۱** شاخص‌های اصلی پژوهش‌های گذشته و پژوهش پیش رو را در زمینه مساله توزیع مواد خطرناک به‌صورت مقایسه‌ای بیان می‌کند.

جدول ۱- بررسی مقایسه‌ای شاخص‌های اصلی پژوهش‌های گذشته.

Table 1- Comparative analysis of the main indicators of past researches.

مقاله	مساله پایه‌ای			معیارهای پایداری				تابع هدف		تعداد دوره		نوع مدل	
	مسیریابی	طراحی	مسیریابی	مسیریابی	زیست‌محیط	اجتماعی	اقتصادی	ریسک	هزینه	دوره‌ای تک	چند دوره‌ای	خطی	غیر خطی
بولا و همکاران [15]			*			*		*		*			*
دو و همکاران [17]			*				*	*		*		*	
فونتاین و مینر [20]		*				*		*	*	*		*	
بولا و همکاران [16]			*				*		*	*			*
من و همکاران [18]			*		*			*			*	*	
ژنگ و همکاران [21]		*			*			*		*		*	
فونتاین و همکاران [22]		*					*		*	*		*	
محبتی و وینل [23]		*					*	*	*	*		*	
ژو و همکاران [19]			*				*	*	*	*		*	
ضیایی و جبارزاده [24]			*		*		*		*	*		*	
بولحسنی و همکاران [26]				*		*	*		*		*	*	
طسوجی و تولت [25]			*				*		*	*		*	
رهبری و همکاران [27]				*	*		*	*			*		*
پژوهش پیش‌رو	*				*	*		*			*		*

باوجود کارهای انجام‌شده توسط پژوهشگران در حوزه مساله مسیریابی تولید، بررسی روند پژوهش‌ها در حوزه توزیع مواد خطرناک نشان می‌دهد که پژوهش‌های اندکی به تاثیرات متقابل این دو مساله به‌طور جامع پرداخته‌اند. این در حالی است که تاثیرات متقابل این دو مساله بر یکدیگر می‌تواند تصمیمات مدیریتی را کمک کند تا وضعیت کلی تولید و توزیع مواد خطرناک بهبود یابد. در بین پژوهش‌های موجود در زمینه حداقل‌سازی ریسک حمل‌ونقل مواد خطرناک تاکنون به تاثیر برنامه تولید این مواد، یعنی حجم تولید و زمان تولید، توجه نشده است. بیشتر پژوهش‌ها تاثیرات مسیریابی بر ریسک را موردتوجه قرار داده‌اند. توجه به حوادث مرتبط با حمل‌ونقل مواد خطرناک، بیشتر به خاطر گستردگی پیامدهای ناگوار آن است. این گستردگی و فاجعه‌بار بودن حوادث در بعضی از مدل‌های ارزیابی ریسک که در گذشته توسط پژوهشگران پیشنهادشده منعکس شده است.

معیارهای پایداری[1] به‌خصوص معیار اقتصادی همیشه مدنظر پژوهشگران قرار داشته است، اما روند پژوهش‌ها نشان‌دهنده افزایش توجه پژوهشگران به دو معیار اجتماعی و زیست‌محیطی است. مواد خطرناک ازجمله موادی هستند که سلامت جامعه و محیط‌زیست را تهدید می‌کنند. مسایل مسیریابی تولید در شرایط معمول عمدتا با اهداف اقتصادی مطرح می‌گردند؛ اما همین مساله زمانی که در حوزه مواد خطرناک مطرح می‌گردد، با هدف مهم‌تری علاوه بر اهداف اقتصادی مطرح می‌گردد که کاهش ریسک تولید و توزیع مواد خطرناک است. این امر مساله را برای پژوهشگران و مدیران تصمیم‌گیرنده جذاب می‌کند.

در این مقاله برای اولین‌بار برای حداقل‌سازی ریسک، حجم و زمان بهینه تولید علاوه بر مسیریابی در یک مدل مسیریابی تولید مواد خطرناک در نظر گرفته شده است. برای منعکس کردن این ایده، از تابع ریسک مناسب غیرخطی و وابسته به میزان بارگذاری ماشین، جمعیت در معرض خطر و نوع ماده خطرناک استفاده شده است. در این مدل متغیرهای مرتبط با میزان تولید و بارگیری وسایل نقلیه و محدودیت‌هایی برای خطی‌سازی مدل غیرخطی در نظر گرفته شده است که در مدل‌های سابق مسیریابی تولید دیده نشده است. در ادامه به بیان مساله پژوهش و نتایج حاصل از آن پرداخته می‌شود.

۳- بیان مساله

با توجه به ماهیت خطرناک مواد موردنظر مساله و اهمیت تاثیرات اجتماعی و زیست‌محیطی این مواد، مهم‌ترین موضوع در این مساله ارزیابی و مدل‌سازی صحیح ریسک می‌باشد تا بتواند واقعیت موجود در این حوزه را به‌خوبی منعکس کند؛ لذا تابع هدف مساله مسیریابی تولید مطرح‌شده برخلاف پژوهش‌های گذشته که حداقل‌سازی هزینه کل می‌باشد، در این پژوهش حداقل‌سازی ریسک کل است. تابع ریسک در نظر گرفته‌شده در مدل مساله، برای این‌که بتواند واقعیت مربوط به معیارهای مساله را در نظر بگیرد، وابسته به میزان بارگذاری ماشین، جمعیت در معرض خطر و نوع ماده خطرناک بیان گردیده است. با توجه به این موضوع تابع هدف مساله به‌صورت یک تابع غیرخطی، حداقل‌سازی ریسک را در نظر می‌گیرد. مساله به‌صورت تک‌هدفه در یک زنجیره‌تامین یک‌سطحی مطرح می‌گردد. تابع هدف مساله منطبق بر تابع هدف ارایه‌شده توسط پژوهش [41] می‌باشد. در ادامه جزییات مربوط به مدل ریاضی مساله به‌تفصیل ارایه می‌گردد.

در این پژوهش، مساله در یک زنجیره‌تامین یک‌سطحی مطرح می‌گردد. تصمیم‌گیری در زنجیره‌تامین به‌صورت متمرکز و توسط یک تصمیم‌گیرنده که تولیدکننده است صورت می‌گیرد. مساله به‌صورت دوره‌ای مطرح‌شده و در ابتدای هر دوره میزان موجودی انبارهای مشتریان و تولیدکننده مشخص بوده و هم‌چنین میزان تقاضای هر یک از مشتریان در هر دوره معین و محدود است. میزان تولید کارخانه، میزان نگهداری موجودی در انبارهای مشتریان و کارخانه، میزان انتقال مواد به هریک از مشتریان و مسیر انتقال مواد به مشتریان در هر دوره ازجمله متغیرهای تصمیم مربوط به مساله می‌باشند. ناوگان حمل‌ونقل مربوط به توزیع مواد همگن بوده و دارای ظرفیت محدود و معین می‌باشد. استفاده از هر یک از ماشین‌های توزیعی دارای ریسک مربوط به انتقال می‌باشد. مدل ریاضی مساله به‌صورت تک‌محصولی، چند دوره‌ای، تک کارخانه‌ای و تک‌هدفه مطرح می‌گردد. مفروضاتی که در مراحل مدل‌سازی و تحلیل و ارزیابی در نظر گرفته خواهند شد عبارت‌اند از:

[1] Sustainability

- تقاضای مشتریان باید در هر دوره به‌صورت کامل برطرف گردد.
- فواصل نقاط به‌صورت اقلیدسی در نظر گرفته می‌شود.
- موقعیت تولیدکنندگان و مشتریان ثابت و معین است.
- تقاضای مشتریان معلوم و ثابت است و هر مشتری بایستی در هر دوره فقط یک‌بار و توسط یک وسیله نقلیه ویزیت گردد.
- ناوگان حمل‌ونقل همگن بوده و هر ماشین در هر دوره یک‌مرتبه می‌تواند راه‌اندازی گردد.
- ظرفیت وسایل نقلیه و ظرفیت موجودی انبارهای تولیدکننده و مشتریان محدود و مشخص است.
- مسیرهای ایجادشده صرفا باید از تولیدکننده شروع و به تولیدکننده ختم گردند.
- تقاضای مشتریان در تمام دوره‌ها یکسان و ثابت است.
- ظرفیت تولید کارخانه در هر دوره ثابت و محدود است.

مجموعه‌ها و اندیس‌های مربوط به مدل ریاضی مساله در **جدول ۲** ارایه شده‌اند.

جدول ۲- مجموعه‌ها و اندیس‌های مدل.
Table 2- Sets and indices of the model.

مجموعه یا اندیس	تعریف
N	مجموعه کل گره‌های شبکه شامل کارخانه و مشتریان $N = \{0, .., n\}$
C	مجموعه گره‌های مربوط به مشتریان $C = N/\{0\}$
K	مجموعه کل وسایل نقلیه موجود $K= \{0, .., \|K\|\}$
T	مجموعه کل دوره‌های موردنظر $T= \{0, .., \|T\|\}$
i & j	اندیس‌های شمارنده هر یک از گره‌های شبکه اعم از کارخانه و مشتریان
k	اندیس شمارنده وسایل نقلیه
t	اندیس شمارنده دوره زمانی

پارامترهای موجود در مدل ریاضی مساله و تعریف آن‌ها در **جدول ۳** ارایه شده است.

جدول ۳- پارامترها (مقادیر ورودی) مدل.
Table 3- Model parameters (input values).

پارامتر	تعریف
d_i^t	در هر دوره i تقاضای مشتری
al_{ij}	j و i فاصله بین دو گره
PD_{ij}	j و i تعداد جمعیت در معرض خطر انتشار مواد خطرناک بین دو گره
$TTAR_k$	به ازای هر کیلومتر طی مسافت k نرخ تصادف ماشین
$P_{Release}$	احتمال انتشار مواد خطرناک در تصادفات
Q	ظرفیت بارگذاری وسایل نقلیه
α & β	مقادیر ثابت وابسته به نوع ماده خطرناک
U_i	i حداکثر ظرفیت انبار
L_i	i حداقل ظرفیت انبار
P_t	t ظرفیت تولید کارخانه در دوره

جدول ۴ نشان‌دهنده متغیرهای مدل و تعریف هر یک از آن‌هاست.

جدول ۴- متغیرهای مدل.

Table 4- Model variables.

متغیر	تعریف
Z	تابع هدف کاهش ریسک
y_{ij}^{kt}	اگر مسیر از گره i به گره j به‌وسیله ماشین k در دوره t پوشش داده شود ۱ و در غیر این صورت ۰.
q_t	میزان تولید کارخانه در دوره t
qs_{ik}^{t}	میزان ارسال بار به مشتری i در دوره t توسط ماشین k
ql_{ij}^{kt}	میزان بارگذاری kth ماشین در مسیر از گره i به گره j در دوره t
I_i^t	میزان موجودی انبار مشتری i در دوره t
I_0^t	میزان موجودی انبار کارخانه در دوره t

۱-۳- مدل ریاضی مساله

مدل نهایی در قالب یک هدف و ۱۹ محدودیت و توضیحات مربوط به آن در ادامه ارایه می‌گردد.

$$MIN\ Z = P_{Release} \times \beta \times \sum_{k\in K}\sum_{t\in T}\sum_{i,j)\in N}\left(ql_{ij}^{kt}\right)^{\alpha} \times TTAR_k \times al_{ij} \times PD_{ij}, \quad (۱)$$

$$I_0^t = I_0^{t-1} + q_t - \sum_{i\in N}\sum_{k\in K} qs_{ik}^t \quad for\ all\ t \in T, \quad (۲)$$

$$I_i^t \le U_i \quad for\ all\ i \in N, t \in T, \quad (۳)$$

$$I_i^t \ge L_i \quad for\ all\ i \in N, t \in T, \quad (۴)$$

$$I_i^t = I_i^{t-1} + \sum_{k\in K} qs_{ik}^t - d_i^t \quad for\ all\ t \in T,\ i \in C, \quad (۵)$$

$$q_t \le P_t \quad for\ all\ t \in T, \quad (۶)$$

$$q_t \le U_0 - I_0^{t-1} \quad for\ all\ t \in T, \quad (۷)$$

$$\sum_{k\in K} qs_{ik}^t \le U_i - I_i^{t-1} \quad for\ all\ t \in T, i \in C, \quad (۸)$$

$$qs_{ik}^t \le U_i \times \sum_{j\in N} y_{ij}^{kt} \quad for\ all\ t \in T, i \in C, k \in K, \quad (۹)$$

$$qs_{ik}^t \le Q \times \sum_{j\in N} y_{ij}^{kt} \quad for\ all\ t \in T, i \in C, k \in K, \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{k\in K} y_{ij}^{kt} \le 1 \quad for\ all\ t \in T, j \in C, \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i\in N} y_{ij}^{kt} + \sum_{i\in N} y_{ji}^{kt} = 2 \times \sum_{i\in N} y_{ij}^{kt} \quad for\ all\ t \in T, j \in N, k \in K, \quad (۱۲)$$

$$y_{ii}^{kt} = 0 \quad for\ all\ t \in T, i \in N, k \in K, \quad (۱۳)$$

$$\sum_{i\in C} y_{i0}^{kt} = \sum_{i\in C} y_{0i}^{kt} \quad for\ all\ t \in T, k \in K, \quad (۱۴)$$

$$\sum_{i\in C} ql_{ik}^t = \sum_{i\in C} qs_{ik}^t \quad for\ all\ t \in T, k \in K, \quad (۱۵)$$

$$ql_{i0}^{kt} = 0 \quad for\ all\ t \in T, i \in C, k \in K, \quad (۱۶)$$

$$\sum_{i\in N} ql_{ij}^{kt} - \sum_{i\in N} ql_{ji}^{kt} = qs_{jk}^t \quad for\ all\ t \in T, j \in C, k \in K, \quad (۱۷)$$

$$ql_{ij}^{kt} \le Q \times y_{ij}^{kt} \quad for\ all\ t \in T, i\&j \in N, k \in K, \quad (۱۸)$$

$$y_{ij}^{kt} \in \{0,1\}, \quad (۱۹)$$

$$q_t, qs_{ik}^t, ql_{ij}^{kt}, I_i^t \ge 0. \quad (۲۰)$$

تابع هدف در **رابطه (۱)** ریسک ناشی از توزیع مواد خطرناک و تبعات ناشی از آن را حداقل می‌کند. در این رابطه از چهار عامل احتمال تصادف، احتمال انتشار مواد خطرناک، میزان انتشار مواد خطرناک و جمعیت در معرض خطر به ازای واحد فاصله برای بیان ریسک استفاده شده است. دو ثابت $a\&b$ نیز تاثیرات مربوط به نوع ماده خطرناک را مدنظر قرار می‌دهند. **رابطه (۲)** بیان می‌کند که موجودی

کارخانه در هر دوره برابر است با موجودی دوره قبل به‌اضافه میزان تولید در آن دوره منهای میزان ارسال کالا به مشتریان در آن دوره. **رابطه‌های (۳)** و **(۴)** به‌ترتیب محدودیت حداکثر و حداقل ظرفیت انبارها را تعیین می‌کند. **رابطه (۵)** بیان می‌کند که سطح موجودی انبارهای مشتریان در هر دوره برابر است با میزان موجودی دوره قبل به‌اضافه میزان دریافت کالا در آن دوره، منهای تقاضای مشتری موردنظر در آن دوره. میزان تولید کارخانه در هر دوره توسط دو **محدودیت‌های (۶)** و **(۷)** کنترل می‌گردد. **رابطه (۸)** میزان ارسال بار برای هر مشتری را متناسب با میزان تقاضا و موجودی انبار آن در هر دوره در نظر می‌گیرد. **رابطه‌های (۹)** و **(۱۰)** سقف میزان بار ارسالی به مشتریان در هر دوره را با توجه به ظرفیت انبارها و ماشین‌ها کنترل می‌کند تا از حد مجاز خارج نگردد. **رابطه (۱۱)** تضمین می‌کند که هر مشتری صرفا توسط یک ماشین در هر دوره باید بازدید شود. هم‌چنین این رابطه به همراه **رابطه‌های (۱۲)** و **(۱۳)** مانع از ایجاد زیرتور می‌گردد. **رابطه (۱۴)** تضمین می‌کند که ماشین‌ها بعد از اتمام سرویس باید حتما به کارخانه برگردند. **محدودیت‌های (۱۵)** و **(۱۶)** نشان می‌دهند که میزان بارگذاری ماشین در ابتدای مسیر باید با میزان بار تخصیص‌داده‌شده به مشتریان آن مسیر برابر بوده و در انتهای مسیر صفر باشد. **رابطه (۱۷)** از دسته محدودیت‌های نقض زیرتور است. **رابطه (۱۸)** محدودیت ظرفیت ماشین را برای میزان بارگذاری ماشین اعمال می‌کند. نهایتا **رابطه‌های (۱۹)** تا **(۲۰)** نوع و علامت متغیرهای مدل را نشان می‌دهند.

۴- خطی‌سازی

با توجه به این‌که تابع هدف کاهش ریسک معرفی‌شده در مدل به‌صورت غیرخطی است و برخورد با توابع هدف غیرخطی باعث افزایش زمان حل و کاهش کیفیت جواب در زمان معقول می‌گردد؛ لذا در این پژوهش برای حل مدل از روش تقریب تکه‌خطی برای تابع هدف استفاده شده است. در ادامه تابع هدف تقریب‌زده خطی به‌همراه محدودیت‌های مربوطه ارایه می‌گردد و پس از آن مدل به دو صورت غیرخطی و خطی حل‌شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

۴-۱- تقریب خطی

متغیر $\left(ql_{ij}^{kt}\right)^{\alpha}$ در تابع هدف به‌صورت غیرخطی ارایه شده است. این متغیر در ادامه با استفاده از تقریب تکه‌خطی در تابع هدف بیان می‌گردد. بازه محدود $[q_0, q_M]$ برای متغیر غیرخطی $\left(ql_{ij}^{kt}\right)^{\alpha}$ به M قطعه $\{l_0, \dots, l_M\}$ به‌صورت افزایشی و متوالی تقسیم می‌گردد. مقدار $\left(ql_{ij}^{kt}\right)^{\alpha}$ به‌وسیله خطی که در هر بخش از دونقطه ابتدایی و انتهایی عبور می‌کند، تقریب زده می‌شود. بنابراین مقدار متغیر $\left(ql_{ij}^{kt}\right)^{\alpha}$ طبق **رابطه (۲۱)** تعریف می‌گردد.

$$\left(ql_{ij}^{kt}\right)^{\alpha} = \left\{a_m + b_m ql_{ij}^{kt}, ql_{ij}^{kt} \in [l_{m-1}, l_m] \quad for\ all\ m \in \{1, \dots, M\}\right\}. \qquad (۲۱)$$

در رابطه فوق $b_m \in R, a_m \in R$ به‌ترتیب بیان‌کننده عرض از مبدا و شیب‌خط تقریب بوده و رابطه $l_0 < l_1 < \dots < l_M$ نیز برقرار است. متغیر t_{ij}^{kt} را به‌عنوان مقدار خطی تقریبی متغیر $\left(ql_{ij}^{kt}\right)^{\alpha}$ در نظر گرفته و مقدار $t_0 = l_0)^{\alpha}$ در نظر گرفته می‌شود. سپس تابع هدف ریسک تقریب‌زده شده با تعریف متغیر صفر و یک h_{ij}^{km} و متغیر مثبت $\lambda_{ij}^{km}, m = 1, \dots, M$ به یک مدل عدد صحیح مختلط تبدیل می‌گردد. متغیر h_{ij}^{km} تفاوت و متغیر λ_{ij}^{km} فاصله بین ql_{ij}^{kt} و l_{m-1} را محاسبه می‌کند. تقریب فوق منطبق بر پژوهش [42] بیان شده است. تابع هدف خطی و محدودیت‌های مربوط به مدل خطی تقریب‌زده‌شده برای هر یک از متغیرها به‌صورت **رابطه (۲۲)** تا **رابطه (۲۸)** می‌باشد.

$$t_{ij}^{kt} = t_0 + \sum_{m=1}^{M} b_m \times \lambda_{ijk}^{mt} \quad for\ all\ i, j \in N, i \neq j, k \in K, t \in T, \qquad (۲۲)$$

$$ql_{ij}^{kt} = l_0 + \sum_{m=1}^{M} \lambda_{ijk}^{mt} \quad for\ all\ i, j \in N, i \neq j, k \in K, t \in T, \qquad (۲۳)$$

$$\lambda_{ijk}^{1t} \leq l_1 - l_0 \quad for\ all\ i, j \in N, i \neq j, k \in K, t \in T, \qquad (۲۴)$$

$$\lambda_{ijk}^{mt} \geq\ l_m - l_{m-1})h_{ijk}^{mt} \quad for\ all\ i, j \in N, i \neq j, k \in K, t \in T, m = 1, \dots, M-1, \qquad (۲۵)$$

$$\lambda_{ijk}^{m+1t} \leq\ l_{m+1} - l_m)h_{ijk}^{mt} \quad for\ all\ i, j \in N, i \neq j, k \in K, t \in T, m = 1, \dots, M-1, \qquad (۲۶)$$

$$h_{ijk}^{mt} \in \{0,1\}, \qquad (۲۷)$$

$$\lambda_{ijk}^{mt}, t_{ij}^{kt} \geq 0. \qquad (۲۸)$$

۵- نتایج عددی

برای ارزیابی کیفیت تقریب خطی انجام‌شده و بررسی نتایج حل مدل مسیریابی تولید ارایه‌شده از نمونه‌های ارایه‌شده توسط [43] استفاده شده است. برای تعیین پارامترهای مربوط به حل مساله، ماده موردنظر سوخت گازوییل با چگالی $2.805\frac{Kg}{Gallon}$ در نظر گرفته شده است. هم‌چنین واحد فاصله برابر با ۱۰۰ متر تعیین شده است. احتمال انتشار مواد خطرناک در محیط برابر $P_{Release}=0.02487845$ در نظر گرفته شده است [44]. هم‌چنین مقادیر دو ثابت $\alpha=0.72,\beta=0.00027$ نیز منطبق بر نوع ماده موردنظر تعیین شده است [45]. در نتیجه با توجه به موارد ذکرشده تابع هدف موردنظر به‌صورت **فرمول (۲۹)** بیان می‌گردد.

$$Z=0.02487845\times0.0027\times\sum_{i,j)\in N}\sum_{k\in K}TTAR_k\times\frac{al_{ij}\times PD_{ij}}{10}\times t_{ij}^{k}. \qquad (۲۹)$$

میزان جمعیت تحت تاثیر در کمان (i,j)؛ PD_{ij} بر اساس یک شبکه مش‌بندی شده منطبق بر ابعاد فضای مسافتی و تعیین چگالی جمعیتی طبق **فرمول (۳۰)** در نظر گرفته می‌شود.

$$PD_{ij}=9500u\left(1-\frac{maxDist-popDist}{maxDist}\right)+500. \qquad (۳۰)$$

در **فرمول (۳۰)**، u بیان‌کننده توزیع یک‌نواخت $u\sim U\ 0.4,0.6)$، $maxDist$ حداکثر فاصله بین طول و عرض در شبکه مسافتی مشبک و $popDist$ حداکثر مقدار تفاوت بین مختصات نقاط موردنظر با گوشه سمت چپ و شبکه مرکزی است. مقدار $TTAR_k$ نیز مطابق رابطه $TTAR_k\sim U[0.6,1.0]10^{-6}\ per\ \ vehicle-Km)\ \ for\ all\ k\in K$ در نظر گرفته شده است [46]. برای تقریب خطی تابع هدف به‌طور ثابت از چهار قطعه خطی تقریب‌زده‌شده بر اساس میزان بارگذاری ماشین در چهار معیار بارگذاری کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد استفاده شده است [41]. میزان این بخش‌ها با توجه به مقدار ظرفیت ماشین بین صفر تا ۴۰۰ در نظر گرفته شده است. مقادیر مربوط به متغیر موردنظر و شیب مربوطه طبق بهترین حالت تقریب‌زده‌شده به‌صورت **رابطه (۳۱)** تا **رابطه (۳۴)** می‌باشد [41].

$$b_1=0.3757\ ,0\le ql_{ij}^{kt}\le 33, \qquad (۳۱)$$

$$b_2=0.2225\ ,33\le ql_{ij}^{kt}\le 109, \qquad (۳۲)$$

$$b_3=0.1723\ ,109\le ql_{ij}^{kt}\le 231, \qquad (۳۳)$$

$$b_4=0.1444\ ,231\le ql_{ij}^{kt}\le 400. \qquad (۳۴)$$

از آن‌جایی‌که پیچیدگی مدل مساله باعث می‌شود که حل مساله در زمان منطقی به نتیجه نرسد و هدف اصلی این پژوهش ایجاد مدل و مقایسات بین دو نوع مدل و هم‌چنین انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مدل است؛ زمان حل در هر دو حالت خطی و غیرخطی به‌صورت محدود، یکسان و به میزان ۳۶۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. برای همه نمونه‌ها حل مدل بعد از زمان تعیین‌شده متوقف شده است. برای حل مدل خطی از حل‌کننده *Cplex*[1] و برای حل مدل غیرخطی از حل‌کننده *Baron* استفاده شده است. سیستم پردازشی برای حل مدل‌ها یک سرور ابری[2] با مشخصات *24 Core, 32 GB RAM* تحت سیستم‌عامل *Windows 10* بوده است. مدل‌ها در نرم‌افزار *GAMS ver.25.1.2, 64Bit* کدنویسی و حل شده‌اند.

تعداد مشتریان در چهار نمونه اول ۱۴ عدد و در چهار نمونه دیگر ۳۰ عدد می‌باشد که هر یک از نمونه‌ها در سایر پارامترهای تعریف‌شده با یکدیگر متفاوت هستند. در هر یک از نمونه‌ها نتایج در ۶ دوره بررسی می‌گردند. نتایج مربوط به حل ۸ نمونه استاندارد مربوط به مساله مسیریابی تولید در دو حالت غیرخطی و خطی در **جدول ۵** قابل‌ملاحظه است. در حالت حل مدل به‌صورت خطی که تابع هدف آن تقریبی از تابع هدف غیرخطی است، مقادیر متغیرها بعد از حل در تابع غیرخطی قرار داده شده و مقدار تابع هدف غیرخطی بر اساس مقادیر متغیرهای مساله حل‌شده توسط مدل خطی محاسبه شده است تا بتوان مقایسه دقیق‌تری از نتایج به‌دست آورد.

[1] Solver

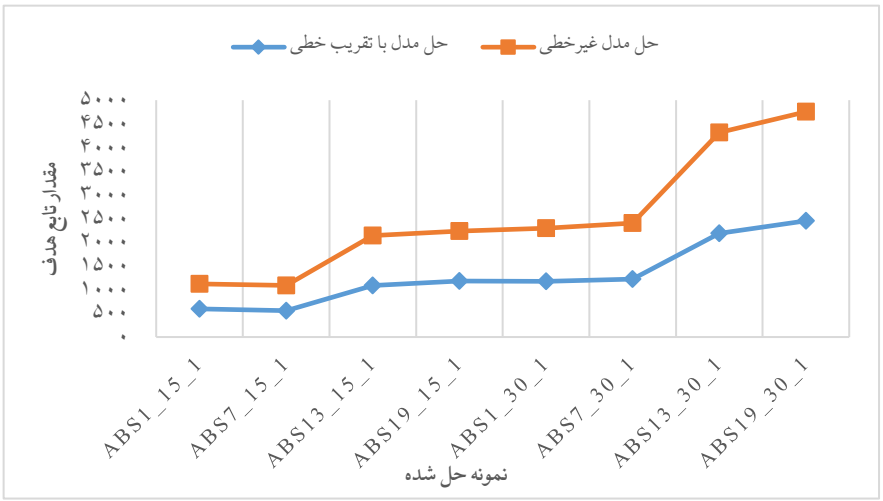
[2] Cloud server

جدول ۵- نتایج حاصل از حل مدل در دو حالت خطی و غیرخطی.

Table 5- The results of solving the model in two linear and non-linear modes.

نمونه حل‌شده	تعداد مشتریان	حل مدل به‌صورت غیرخطی		حل مدل به‌صورت خطی	
		مقدار تابع هدف غیرخطی		مقدار تابع هدف غیرخطی	مقدار تابع هدف خطی تقریبی
ABS1_15_1	14	592.047		528.125	487.069
ABS7_15_1	14	557.227		533.125	492.069
ABS13_15_1	14	1090.651		1051.888	974.041
ABS19_15_1	14	1184.498		1052.799	975.044
ABS1_30_1	30	1178.12		1121.026	1062.072
ABS7_30_1	30	1226.068		1178.576	1091.583
ABS13_30_1	30	2192.181		2122.62	1993.992
ABS19_30_1	30	2452.261		2301.2	2252.852

همان‌طور که از نتایج به‌دست‌آمده مشخص است تقریب تکه‌خطی انجام‌شده از تابع هدف غیرخطی مساله توانسته است نتایج بهتری را نسبت به مدل غیرخطی در همه نمونه‌ها ایجاد کند. اختلاف قابل‌توجه بین دو مقدار تابع هدف غیرخطی با زمان حل یکسان گویای اثربخش بودن تقریب خطی موردنظر است. این در حالی است که به‌طورکلی نیز کار با مدل‌های خطی آسان‌تر و متنوع‌تر از مدل‌های غیرخطی است. نمودار **شکل ۱** به‌وضوح نمایانگر نتایج به‌دست آمده است.



شکل ۱- نمودار اختلاف بین مقادیر تابع هدف غیرخطی در دو حالت حل به‌صورت خطی و غیرخطی.

Figure 1- Diagram of the difference between the values of the non-linear objective function in linear and non-linear solution mode.

۶- تحلیل حساسیت

هدف مدل کاهش ریسک ناشی از توزیع مواد خطرناک است لذا ازجمله مواردی که می‌توان با تصمیم‌گیری صحیح در رابطه با آن مدیریت بهتری بر ریسک ناشی از توزیع مواد خطرناک در سطح زنجیره‌تامین داشت؛ ظرفیت موجودی انبارها و هم‌چنین ظرفیت تولید کارخانه در هر دوره می‌باشد. در این بخش برای بررسی تاثیرات مربوط به پارامترهای مدل تحلیل حساسیت برای دو پارامتر حداکثر ظرفیت انبارها و هم‌چنین ظرفیت تولید ارایه می‌گردد. با توجه به بهتر بودن جواب‌های مربوط به مدل تقریب خطی؛ در تحلیل حساسیت نیز از مدل خطی برای انجام مقایسات و به‌دست آوردن نتایج استفاده گردیده است. آن‌چه که خطرساز است انتقال مواد خطرناک از کارخانه به محل انبار مشتریان است که هر چه میزان این نقل و انتقالات کاهش پیدا کند متعاقبا میزان خطر نیز کاهش پیدا می‌کند. البته میزان بارگذاری ماشین نیز یک عامل تاثیرگذار بر ریسک توزیع است که تاثیر کم‌تری نسبت به تعداد نقل و انتقالات دارد. اگر بتوان با تغییر ظرفیت انبارها و ظرفیت تولید بیشترین حجم انتقال توسط ماشین را استفاده کرد؛ می‌توان شاهد کاهش میزان انتقالات و متعاقبا کاهش خطرات ناشی از آن بود. برای بررسی دقیق این موضوع در این پژوهش با ایجاد تغییراتی در میزان ظرفیت حداکثری انبارها و هم‌چنین تغییراتی در ظرفیت تولید کارخانه‌ها و بررسی و حل مجدد مدل، یک تحلیل حساسیت انجام شده است. ابتدا ظرفیت انبارها در هر مرحله با افزایش‌های ۱۰ واحدی به‌صورت پله‌ای موردبررسی قرار گرفته است. این افزایش‌ها تا جایی ادامه داشته است که دیگر تاثیری بر جواب مساله نداشته است. در مرحله بعد با کاهش ۵۰ واحدی ظرفیت تولید به‌صورت پله‌ای تا جایی که مساله جواب شدنی داشته باشد، مدل حل شده است و نتایج مربوط به آن در **جدول ۶** قابل مشاهده است. لازم به‌ذکر است که مابقی پارامترها در مدل هیچ تغییری نداشته‌اند. مدل نیز در تمامی موارد

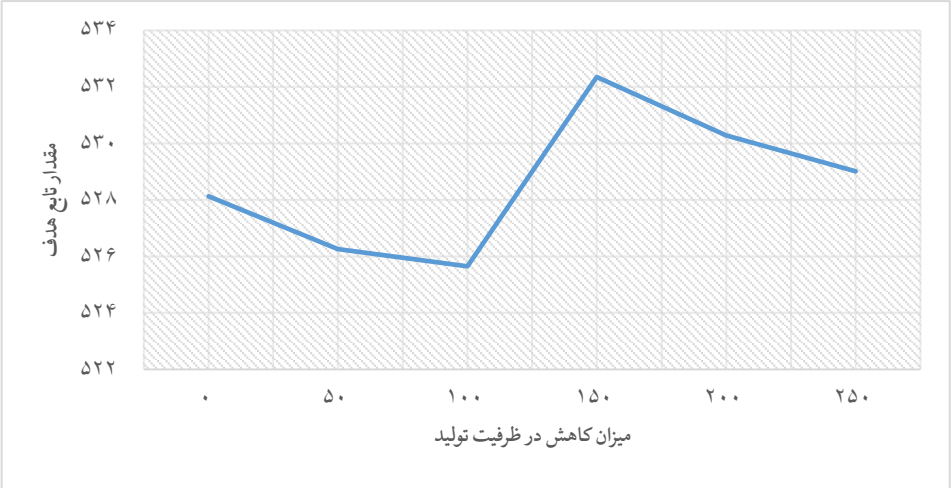
برای نمونه *ABS1_15_1* با ۱۴ مشتری بررسی شده است و با همان سیستم پردازشی حل شده است. ضمنا میزان تابع هدف غیرخطی منطبق بر متغیرهای به‌دست‌آمده توسط مدل خطی ملاک مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۶- بررسی تاثیرات ناشی از تغییر پارامترهای مدل بر میزان تابع هدف.

Table 6- The effect of changing model parameters on objective function.

تغییر در ظرفیت تولید		تغییر در ظرفیت انبارها	
مقدار تابع هدف غیرخطی	نوع و میزان تغییر	مقدار تابع هدف غیرخطی	نوع و میزان تغییر
528.125	0	528.125	0
526.264	-50	509.235	+10
525.65	-100	466.958	+20
532.351	-150	451.49	+30
530.284	-200	442.386	+40
529.012	-250	442.386	+50

نتایج به‌دست‌آمده مربوط به تغییر در ظرفیت تولید در **شکل ۲** به‌صورت نموداری خطی نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار و جدول نتایج مشخص است، کاهش ظرفیت تولید تا مقدار یک‌صد واحد تاثیر اندکی در کاهش میزان ریسک داشته است. این مساله ناشی از این است که کاهش میزان تولید باعث شده است مدل صرفا سعی در برآورده کردن تقاضای مشتریان داشته باشد و کم‌تر به پرسازی انبارها بپردازد و این امر باعث شده است همان تعداد حمل‌ونقل اما با میزان بارگذاری کم‌تری انجام گردد. میزان بارگذاری کم‌تر ماشین‌ها متعاقبا ریسک را کاهش خواهد داد؛ اما در ادامه با کاهش حدود ۱۵۰ واحدی ظرفیت تولید مدل مجبور است که تمام تقاضا را در دوره‌های مربوط به خود تامین کند و این امر باعث می‌شود تعداد انتقالات در هر دوره افزایش یابد و متعاقبا ریسک مربوطه نیز افزایش یابد. در حالت کلی چیزی که قابل‌ملاحظه است تغییر در ظرفیت تولید تاثیر زیادی در ریسک توزیع مواد خطرناک ندارد. با توجه به تاثیر غیرمستقیم ظرفیت تولید بر میزان نقل و انتقالات، این مساله منطقی به‌نظر می‌رسد. با وجود تاثیر ناچیز ظرفیت تولید، اما با توجه به اهمیت بالای خطرات ناشی از توزیع مواد خطرناک نباید از همین تاثیر ناچیز نیز در مدیریت تولید و توزیع مواد خطرناک چشم‌پوشی کرد.

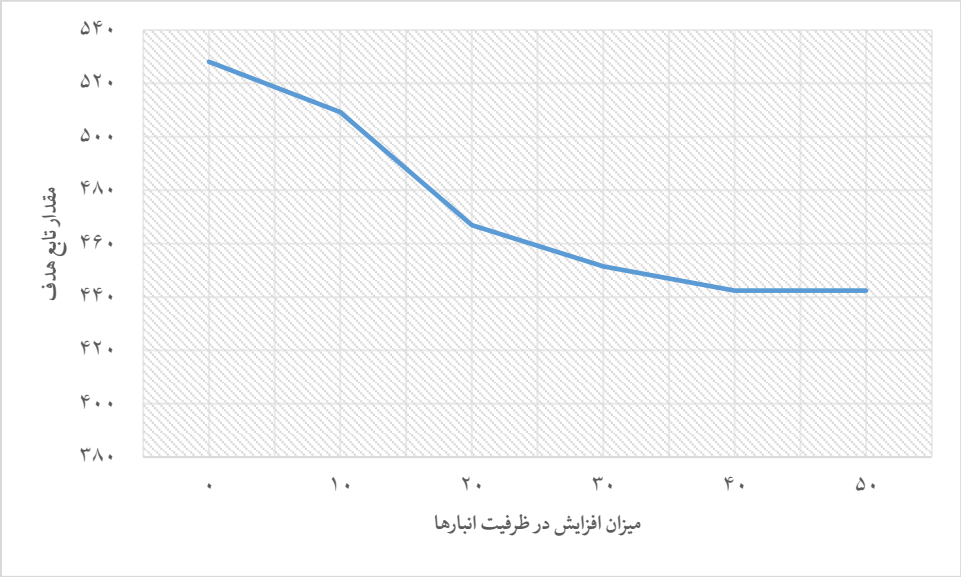


شکل ۲- نمودار تاثیرات تغییر ظرفیت تولید بر ریسک.

Figure 2- Diagram of the effect of changing production capacity on risk.

شکل ۳ نمودار مربوط به تاثیر تغییرات ظرفیت انبارها بر ریسک توزیع مواد خطرناک را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از اعداد جدول مشخص است تاثیر ظرفیت انبارها بیشتر از تاثیر ظرفیت تولید بر ریسک توزیع است. به‌عنوان نمونه افزایش ۲۰ واحدی ظرفیت انبارهای کارخانه و مشتریان باعث کاهش ۶۳ واحدی ریسک گردیده است. افزایش ظرفیت انبارها باعث می‌شود که بتوان در هر نقل‌وانتقال از حداکثر ظرفیت ماشین‌ها برای توزیع استفاده کرد. این مساله باعث کاهش تعداد حمل‌ونقل در دوره‌های مختلف می‌گردد که متعاقبا باعث کاهش ریسک توزیع مواد خطرناک می‌گردد. لازم به‌ذکر است که این تغییرات تا جایی می‌تواند بر میزان ریسک تاثیرگذار باشد. نمودار نشان می‌دهد که افزایش تغییرات بعد از حدود ۳۰ واحد با شیب کمی بر ریسک تاثیرگذار است و حتی تا حدودی می‌توان دید که بی‌تاثیر می‌گردد. این مساله ناشی از این است که اگر حتی ظرفیت انبارها افزایش پیدا کند اما ماشین‌ها با ظرفیت کامل به توزیع بپردازند، دیگر ماشین‌ها توان پردازش بیشتر ندارند و تاثیر چندانی بر روی تعداد رفت‌وآمدها و ریسک مربوطه ندارند. با توجه به اهمیت و خطرات ناشی از توزیع مواد خطرناک تصمیمات مدیریتی با ایجاد تغییرات بر روی پارامترهای مساله به‌خوبی می‌توانند تا حد امکان

خطرات ناشی از مواد خطرناک را کاهش دهند؛ اما این مساله باید طوری صورت گیرد که بهترین تعادل بین سایر عوامل در واقعیت مانند هزینه و محدودیت‌های امکانی نیز برقرار گردد.



شکل ۳- نمودار تاثیرات تغییر ظرفیت انبارها بر ریسک.

Figure 3- Diagram of the effect of changing warehouse capacity on risk.

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

این پژوهش به بررسی مساله مسیریابی تولید برای مواد خطرناک با هدف کاهش ریسک پرداخته است. تابع هدف ریسک مربوط به مدل ریاضی به‌صورت غیرخطی مطرح شده است و با یک تقریب تکه‌خطی به یک تابع خطی عدد صحیح تبدیل‌شده و نتایج مربوطه در هر دو حالت بررسی و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده به‌وضوح کیفیت تقریب انجام‌شده در حل مساله را نشان می‌دهد. هم‌چنین یکی از عیوب دیگر مربوط به حل مدل به‌صورت غیرخطی این است که در زمان‌های پایین به هیچ جواب شدنی دست پیدا نمی‌کند. نویسندگان برای بررسی کیفیت جواب‌ها در زمان‌های مختلف، اقدام به محدود کردن زمان حل مساله به اعداد مختلف کردند. زمان‌هایی مانند ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. جالب است که در زمان‌های فوق مدل غیرخطی نتوانست به جواب شدنی دست پیدا کند؛ این در حالی است که مدل تقریب خطی حتی در زمان کم‌تر از ۱۰۰ ثانیه نیز یک جواب شدنی ارایه می‌کند.

تحلیل حساسیت انجام‌شده به‌وضوح نمایانگر تاثیرات مربوط به ظرفیت انبارها و ظرفیت تولید کارخانه بر روی تعداد نقل‌وانتقالات مربوط به توزیع مواد خطرناک و متعاقبا تاثیر مستقیم بر ریسک مربوطه می‌باشد. این موضوع می‌تواند برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان اهرمی باشد که با استفاده از آن بتوانند کنترل بهتری بر ریسک عملیات حمل‌ونقل، با توجه به امکانات و بودجه موردنظر داشته باشند. هم‌چنین در یک زنجیره‌تامین که تصمیمات به‌صورت متمرکز اتخاذ می‌گردد، مدیریت صحیح پارامترهای تاثیرگذار در مدل می‌تواند ریسک و آسیب‌های مربوط به توزیع مواد خطرناک را تا حد قابل‌توجهی کاهش دهد.

محدودیت‌هایی نیز در مدل وجود دارد ازجمله این‌که، بهینه‌سازی هزینه‌های مربوط به مدل در نظر گرفته نشده است، هرچند می‌توان با تعیین حدود بالا و پایین موجودی‌ها، هزینه‌ها را در مدل کنترل کرد. محدودیت دیگر زمان حل مسایل است؛ با وجود این‌که خطی‌سازی مدل ریاضی زمان حل مساله را کاهش می‌دهد اما هم‌چنان زمان حل برای مسایل بزرگ زیاد است. هم‌چنین مدل مساله به‌صورت تک‌محصولی بیان شده است، درصورتی‌که در عمل بسیاری از تولیدکننده‌ها چند محصول را به‌صورت هم‌زمان تولید می‌کنند.

به‌عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی بیان مدل به‌صورت دوهدفه که هم‌زمان به‌دنبال کاهش ریسک و هزینه کل است می‌تواند موردتوجه قرار گیرد. هم‌چنین ارایه الگوریتم‌های فرا ابتکاری کارا که بتواند در زمان معقول جوابی مناسب را برای مساله با ابعاد بزرگ ارایه دهد جالب‌توجه است. هم‌چنین توسعه مدل برای حالت چندمحصولی نیز می‌تواند مساله را به شرایط واقعی نزدیک کند.

فرح‌بخش و خیرخواه/ تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲، صفحه: ۹۳۰-۹۱۷

منابع

[1] Díaz-Madroñero, M., Mula, J., Jiménez, M., & Peidro, D. (2017). A rolling horizon approach for material requirement planning under fuzzy lead times. *International journal of production research*, *55*(8), 2197–2211. DOI:10.1080/00207543.2016.1223382

[2] Armentano, V. A., Shiguemoto, A. L., & Løkketangen, A. (2011). Tabu search with path relinking for an integrated productiondistribution problem. *Computers and operations research*, *38*(8), 1199–1209. DOI:10.1016/j.cor.2010.10.026

[3] Adulyasak, Y., Cordeau, J. F., & Jans, R. (2015). The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms. *Computers and operations research*, *55*, 141–152. DOI:10.1016/j.cor.2014.01.011

[4] Chandra, P., & Fisher, M. L. (1994). Coordination of production and distribution planning. *European journal of operational research*, *72*(3), 503–517. DOI:10.1016/0377-2217(94)90419-7

[5] Fortes, A., Camargo, R., Muniz, L. R., Lima, F. M. de S., & Cota, F. dos R. (2022). Efficient matheuristics to solve a rich production-routing problem. *Computers and industrial engineering*, *171*, 108369. DOI:10.1016/j.cie.2022.108369

[6] Erkut, E., & Verter, V. (1998). Modeling of transport risk for hazardous materials. *Operations research*, *46*(5), 625–642. DOI:10.1287/opre.46.5.625

[7] Holeczek, N. (2019). Hazardous materials truck transportation problems: A classification and state of the art literature review. *Transportation research part d: transport and environment*, *69*, 305–328. DOI:10.1016/j.trd.2019.02.010

[8] Kané, L., Diakité, M., Kané, S., Bado, H., Konaté, M., & Traoré, K. (2021). A new algorithm for fuzzy transportation problems with trapezoidal fuzzy numbers under fuzzy circumstances. *Journal of fuzzy extension and applications*, *2*(3), 204–225.

[9] Bianco, L., Caramia, M., & Giordani, S. (2009). A bilevel flow model for HAZMAT transportation network design. *Transportation research part c: emerging technologies*, *17*(2), 175–196. DOI:10.1016/j.trc.2008.10.001

[10] Kalelkar, A. S., & Brooks, R. E. (1978). Use of multidimensional utility functions in hazardous shipment decisions. *Accident analysis and prevention*, *10*(3), 251–265. DOI:10.1016/0001-4575(78)90016-7

[11] Pourghade Chobar, A., Sabk ara, M., Moradi Pirbalouti, S., Khadem, M., & Bahrami, S. (2021). A Multi-Objective Location-Routing Problem Model for Multi-Device Relief Logistics under Uncertainty Using Meta-Heuristic Algorithm. *Journal of applied research on industrial engineering*, *9*(3), 354–373.

[12] Fan, L. (2022). A short study of the components and applications of wireless sensor network. *Big data and computing visions*, *2*(2), 101–106.

[13] Erkut, E., Tjandra, S. A., & Verter, V. (2007). Hazardous materials transportation. *Handbooks in operations research and management science*, *14*, 539–621.

[14] Bianco, L., Caramia, M., Giordani, S., & Piccialli, V. (2013). International series in operations research and management science. *Springer*. Academic Journals.

[15] Bula, G. A., Prodhon, C., Gonzalez, F. A., Afsar, H. M., & Velasco, N. (2017). Variable neighborhood search to solve the vehicle routing problem for hazardous materials transportation. *Journal of hazardous materials*, *324*, 472–480. DOI:10.1016/j.jhazmat.2016.11.015

[16] Bula, G. A., Murat Afsar, H., González, F. A., Prodhon, C., & Velasco, N. (2019). Bi-objective vehicle routing problem for hazardous materials transportation. *Journal of cleaner production*, *206*, 976–986. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.09.228

[17] Du, J., Li, X., Yu, L., Dan, R., & Zhou, J. (2017). Multi-depot vehicle routing problem for hazardous materials transportation: A fuzzy bilevel programming. *Information sciences*, *399*, 201–218.

[18] Men, J., Jiang, P., & Xu, H. (2019). A chance constrained programming approach for HAZMAT capacitated vehicle routing problem in Type-2 fuzzy environment. *Journal of cleaner production*, *237*, 117754. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.117754

[19] Zhou, Z., Ha, M., Hu, H., & Ma, H. (2021). Half open multi-depot heterogeneous vehicle routing problem for hazardous materials transportation. *Sustainability (switzerland)*, *13*(3), 1–17. DOI:10.3390/su13031262

[20] Fontaine, P., & Minner, S. (2018). Benders decomposition for the HAZMAT Transport Network Design Problem. *European journal of operational research*, *267*(3), 996–1002. DOI:10.1016/j.ejor.2017.12.042

[21] Zhang, L., Feng, X., Chen, D., Zhu, N., & Liu, Y. (2019). Designing a hazardous materials transportation network by a bi-level programming based on toll policies. *Physica a: statistical mechanics and its applications*, *534*, 122324. DOI:10.1016/j.physa.2019.122324

[22] Fontaine, P., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Minner, S. (2020). Population-based risk equilibration for the multimode HAZMAT transport network design problem. *European journal of operational research*, *284*(1), 188–200. DOI:10.1016/j.ejor.2019.12.028

[23] Mohabbati-Kalejahi, N., & Vinel, A. (2021). Robust hazardous materials closed-loop supply chain network design with emergency response teams location. *Transportation research record*, *2675*(6), 306–329. DOI:10.1177/0361198121992071

[24] Ziaei, Z., & Jabbarzadeh, A. (2021). A multi-objective robust optimization approach for green location-routing planning of multi-modal transportation systems under uncertainty. *Journal of cleaner production*, *291*, 125293. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.125293

[25] Tasouji Hassanpour, S., Ke, G. Y., & Tulett, D. M. (2021). A time-dependent location-routing problem of hazardous material transportation with edge unavailability and time window. *Journal of cleaner production*, *322*, 128951. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.128951

[26] Bolhasani, P., Fallah, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Alam Tabriz, A. (2021). Presenting a multi-objective mathematical model of a location-routing-inventory problem for hazardous materials considering the concept elastic demand and queuing system. *Journal of decisions and operations research*, *6*(2), 210–241. (**In Persian**). https://www.journal-dmor.ir/article_136500_495740a95cc285e0d82b225078bbe378.pdf

[27] Rahbari, M., Arshadi Khamseh, A., Sadati-Keneti, Y., & Jafari, M. J. (2022). A risk-based green location-inventory-routing problem for hazardous materials: NSGA II, MOSA, and multi-objective black widow optimization. *Environment, development and sustainability*, *24*(2), 2804–2840. DOI:10.1007/s10668-021-01555-1

[28] Fang, J. (2022). Smart phone based monitoring of agricultural activities. *Computational algorithms and numerical dimensions*, *1*(4), 159–163.

[29] Salamatbakhsh, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pahlevani, A. (2021). Solving a vehicle routing problem under uncertainty by a differential evolution algorithm. *Inovation management and operational strategies*, *1*(4), 310–319. (**In Persian**). https://doi.org/10.22105/imos.2021.272652.1034

[30] Chen, Z. L. (2010). Integrated production and outbound distribution scheduling: Review and extensions. *Operations research*, *58*(1), 130–148. DOI:10.1287/opre.1080.0688

[31] Low, C., Chang, C. M., Li, R. K., & Huang, C. L. (2014). Coordination of production scheduling and delivery problems with heterogeneous fleet. *International journal of production economics*, *153*, 139–148.

[32] Li, Y., Chu, F., Chu, C., & Zhu, Z. (2019). An efficient three-level heuristic for the large-scaled multi-product production routing problem with outsourcing. *European journal of operational research*, *272*(3), 914–927.

[33] Hemmati Golsefidi, A., & Akbari Jokar, M. R. (2020). A robust optimization approach for the production-inventory-routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers and industrial engineering*, *143*, 106388. DOI:10.1016/j.cie.2020.106388

[34] Emamian, Y., Kamalabadi, I. N., & Eydi, A. (2021). Developing and solving an integrated model for production routing in sustainable closed-loop supply chain. *Journal of cleaner production*, *302*, 126997. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.126997

[35] Schenekemberg, C. M., Scarpin, C. T., Pecora Jr, J. E., Guimarães, T. A., & Coelho, L. C. (2021). The two-echelon production-routing problem. *European journal of operational research*, *288*(2), 436–449.

[36] Chen, H. K., Hsueh, C. F., & Chang, M. S. (2009). Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products. *Computers and operations research*, *36*(7), 2311–2319.

[37] Amorim, P., Belo-Filho, M. A. F., Toledo, F. M. B., Almeder, C., & Almada-Lobo, B. (2013). Lot sizing versus batching in the production and distribution planning of perishable goods. *International journal of production economics*, *146*(1), 208–218. DOI:10.1016/j.ijpe.2013.07.001

[38] Lei, L., Liu, S., Ruszczynski, A., & Park, S. (2006). On the integrated production, inventory, and distribution routing problem. *IIE transactions (institute of industrial engineers)*, *38*(11), 955–970.

[39] Ganji, M., Kazemipoor, H., Hadji Molana, S. M., & Sajadi, S. M. (2020). A green multi-objective integrated scheduling of production and distribution with heterogeneous fleet vehicle routing and time windows. *Journal of cleaner production*, *259*, 120824. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.120824

[40] Li, Y., Chu, F., Côté, J. F., Coelho, L. C., & Chu, C. (2020). The multi-plant perishable food production routing with packaging consideration. *International journal of production economics*, *221*, 107472. DOI:10.1016/j.ijpe.2019.08.007

[41] Bula, G. A., Gonzalez, F. A., Prodhon, C., Afsar, H. M., & Velasco, N. M. (2016). Mixed integer linear programming model for vehicle routing problem for hazardous materials transportation. *IFAC-papersonline*, *49*(12), 538–543. DOI:10.1016/j.ifacol.2016.07.691

[42] Padberg, M. (2000). Approximating separable nonlinear functions via mixed zero-one programs. *Operations research letters*, *27*(1), 1–5. DOI:10.1016/s0167-6377(00)00028-6

[43] Absi, N., Archetti, C., Dauzère-Pérès, S., Feillet, D., & Speranza, M. G. (2018). Comparing sequential and integrated approaches for the production routing problem. *European journal of operational research*, *269*(2), 633–646. DOI:10.1016/j.ejor.2018.01.052

[44] Kazantzi, V., Kazantzis, N., & Gerogiannis, V. C. (2011). Risk informed optimization of a hazardous material multi-periodic transportation model. *Journal of loss prevention in the process industries*, *24*(6), 767–773.

[45] Ronza, A., Vílchez, J. A., & Casal, J. (2007). Using transportation accident databases to investigate ignition and explosion probabilities of flammable spills. *Journal of hazardous materials*, *146*(1–2), 106–123. DOI:10.1016/j.jhazmat.2006.11.057

[46] Reilly, A., Nozick, L., Xu, N., & Jones, D. (2012). Game theory-based identification of facility use restrictions for the movement of hazardous materials under terrorist threat. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, *48*(1), 115–131. DOI:10.1016/j.tre.2011.06.002

فرج‌بخش و خیرخواه / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲، صفحه: ۹۳۰-۹۱۷