University of Tehran

Environmental ***Hazards*** **Management**

Home Page: https://jhsci.ut.ac.ir

Online ISSN: 2383-0530

Decreasing the Hazards in Routing the Gasoline Fuel Distribution with Applying the Improved Strength Pareto Evolutionary Algorithm under Fuzzy Conditions (Case Study: Bushehr Province)

Hmaid Shahbandarzadeh[1*] | Afshin Fahimi[2] | Mohammad Hossein Kabgani[3]

1. Corresponding Author, Faculty of Business and Economics, Persian Gulf University, Bushehr, Iran. Email: Shahbandarzadeh@pgu.ac.ir
2. Faculty of Business and Economics, Persian Gulf University, Bushehr, Iran. Email: afshin476630@gmail.com
3. Faculty of Business and Economics, Persian Gulf University, Bushehr, Iran. Email: Mh.kabgani@pgu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received 6 February 2023
Received 25 February 2023
Accepted 1 March 2023

Keywords:
Vehicle routing,
Evolutionary algorithm,
Multi-criteria decision making,
fuzzy best-worst method,
transportation of hazardous materials.

ABSTRACT

Considering that the transportation of hazardous materials is associated with a very high risk of human, natural and environmental damage, in addition to paying attention to the economic aspects of the routing of hazardous materials, more emphasis should be placed on reducing population and environmental risks. In this research, a multi-objective model was designed for the problem of vehicle routing to distribute gasoline to fuel stations in Bushehr province in fuzzy conditions, and safety considerations were emphasized. Therefore, the goal is to find the shortest route while respecting safety and environmental considerations.

Methods: Fuzzy logic was used to calculate the risk of the route and the amount of pollution emitted by gasoline vehicles, and to examine the routes in the GIS software and the natural environment, as well as to collect experts' opinions in the form of a questionnaire. To weight the types of risks and objective functions, the best-worst fuzzy multi-criteria decision-making method was used, and to solve the proposed model, the evolutionary algorithm based on improved Pareto intensity was used.

Results: Because in many routing models, the assumption of uncertainty of some parameters seems to be an inevitable assumption. The problems of positioning and routing and the optimal allocation of vehicles are one of the important decisions of organizations because with optimal routing and positioning, optimal allocation of vehicles and then determining the optimal number of cars can reduce an important percentage of related costs. The results of this research show that three optimal solutions on the Pareto frontier have been determined according to the three goals of route travel time, route risk, and the amount of environmental pollution caused by fuel distribution for the route. Also, according to the calculation of the optimal weights for each objective function and the calculation of the weighted average for the Pareto optimal solutions, as well as the field investigation of the proposed

Cite this article: Shahbandarzadeh, H., Fahimi, A., Kabgani, M.H. (2023). Decreasing the Hazards in Routing the Gasoline Fuel Distribution with Applying the Improved Strength Pareto Evolutionary Algorithm under Fuzzy Conditions (Case Study: Bushehr Province). *Environmental Hazards Management*, 9 (4), 367-381. DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2023.250533.325

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2023.250533.325

route in terms of the presence of accident-prone points and the risk of the route, the Pareto optimal solution was first selected as the optimal route.

Conclusions: Finally, by solving the model and applying weights to the objective functions based on the experts' opinions, the optimal route was identified and introduced. In this research, an attempt has been made to examine innovation from three aspects: theoretical, technical and practical gaps, which can be mentioned as the strengths of the current research compared to other research. From a theoretical point of view, it has been tried to carry out a relatively comprehensive study of factors affecting the routing of the distribution of hazardous materials (such as gasoline) to determine the optimal route. Also, from the technical point of view, the current research is innovative by focusing on combining fuzzy logic with a multi-objective SPEA2 algorithm. Finally, it has been tried to reduce the practical vacuum of previous research in this field by developing optimal routes.

دانشگاه تهران

مدیریت مخاطرات محیطی

سایت نشریه: https://jhsci.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۸-۲۴۲۳

کاهش مخاطرات در مسیریابی توزیع سوخت بنزین با به‌کارگیری الگوریتم تکاملی مبتنی بر شدت پارتو بهبودیافته تحت شرایط فازی (مطالعهٔ موردی: استان بوشهر)

حمید شاه‌بندرزاده[۱*] | افشین فهیمی[۲] | محمدحسین کبگانی[۳]

۱. نویسندهٔ مسئول، گروه مدیریت صنعتی، دانشکدهٔ کسب و کار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر. رایانامه: shahbandarzadeh@pgu.ac.ir

۲. گروه مدیریت صنعتی، دانشکدهٔ کسب‌وکار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر. رایانامه: afshin476630@gmail.com

۳. گروه مدیریت صنعتی، دانشکدهٔ کسب‌وکار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر. رایانامه: mh.kabgani@pgu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی کاربردی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

کلیدواژه:
الگوریتم تکاملی،
تصمیم‌گیری چندمعیاره،
حمل‌ونقل مواد خطرناک،
روش بهترین- بدترین فازی،
مسیریابی وسایل نقلیه.

چکیده

با توجه به اینکه حمل‌ونقل مواد خطرناک با خطر بسیار شدید آسیب‌های انسانی، طبیعی و زیست‌محیطی همراه است، افزون‌بر توجه به جنبه‌های اقتصادی در مسیریابی مواد خطرناک باید تأکید بیشتری بر کاهش مخاطرات جمعیتی و زیست‌محیطی صورت گیرد. در این پژوهش مدلی چندهدفه برای مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیه برای توزیع سوخت بنزین به جایگاه‌های سوخت استان بوشهر در شرایط فازی طراحی و بر رعایت ملاحظات ایمنی تأکید شد. بنابراین هدف یافتن کوتاه‌ترین مسیر با رعایت ملاحظات ایمنی و زیست‌محیطی است. برای محاسبهٔ ریسک مسیر و مقدار آلودگی انتشاریافته از وسایل نقلیهٔ حمل بنزین، از منطق فازی و بررسی مسیرهای موجود در نرم‌افزار GIS و محیط طبیعی و همچنین جمع‌آوری نظر خبرگان در قالب پرسشنامه استفاده شد. برای وزن‌دهی به انواع ریسک و توابع هدف روش تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ بهترین- بدترین فازی به‌کار گرفته شد و برای حل مدل پیشنهادی از الگوریتم تکاملی مبتنی بر شدت پارتو بهبودیافته استفاده شد. در نهایت با حل مدل و اعمال وزن به توابع هدف براساس نظر متخصصان، مسیر بهینه مشخص و معرفی شد. براساس نتایج این پژوهش، سه جواب بهینه روی مرز پارتو با توجه به سه هدف زمان سفر مسیر، ریسک مسیر و همچنین مقدار آلودگی زیست‌محیطی ناشی از توزیع سوخت برای مسیر به‌دست‌آمده مشخص شد. همچنین با توجه به محاسبهٔ وزن‌های بهینه برای هر تابع هدف و محاسبهٔ میانگین وزنی برای جواب‌های بهینهٔ پارتو و نیز بررسی میدانی مسیر پیشنهادی از نظر وجود نقاط حادثه‌خیز و ریسک مسیر، جواب بهینهٔ پارتو نخست، مسیر بهینه انتخاب شد.

استناد: شاه‌بندرزاده، حمید؛ فهیمی، افشین؛ کبگانی، محمدحسین (۱۴۰۱). کاهش مخاطرات در مسیریابی توزیع سوخت بنزین با به‌کارگیری الگوریتم تکاملی مبتنی بر شدت پارتو بهبودیافته تحت شرایط فازی (مطالعهٔ موردی: استان بوشهر). *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۹ (۴)، ۳۶۷-۳۸۱.

DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2023.250533.325

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2023.250533.325

مقدمه

مادهٔ خطرناک به ماده‌ای گفته می‌شود که با وجود کاربرد زیاد در صنعت، با توجه به خصوصیات فیزیکی- شیمیایی ممکن است سبب آسیب‌دیدگی عنصر آسیب‌پذیر شود. آسیب‌پذیرها شامل انسان، جانوران، محیط زیست یا اموال و ساختمان‌ها هستند. در ایران نیز با رشد صنعت، نیاز به استفاده از این مواد بیش از پیش احساس می‌شود [۱۵]. برای جلوگیری از تبدیل ریسک‌های حمل مواد خطرناک به آسیب، خسارت یا تلفات راهکارهایی وجود دارد که این ریسک‌ها را کاهش می‌دهد یا از شدت عواقب آن می‌کاهد. حوادث مربوط به مواد خطرناک، حوادث «کم‌احتمال- پرپیامد» نام دارند. بنابراین علی‌رغم احتمال وقوع به‌نسبت کم این نوع حوادث، پیامدهای آنها بسیار زیاد و گاه فاجعه‌آمیز خواهد بود. مواد خطرناک موادی‌اند که از نظر بهداشت یا سلامت انسان، حیوان و محیط زیست ذاتاً خطرزا هستند که در نه گروه ه مواد منفجره، گازها، مایعات اشتعال‌پذیر، جامدات اشتعال‌پذیر، مواد اکسیدکننده، مواد سمی و میکروبی، مواد رادیواکتیو، مواد خورنده و مواد خطرناک متفرقه طبقه‌بندی شده‌اند [۳].

ابعاد پژوهش در زمینهٔ حمل مواد خطرناک را می‌توان به چهار دسته طبقه‌بندی کرد: ۱. شناخت خصوصیات مواد و مطالعات آیین‌نامه‌ای برای حمل مواد خطرناک؛ ۲. ارزیابی و محاسبات ریسک؛ ۳. مسیریابی و بهینه‌سازی مسیر؛ ۴. طراحی شبکه. ابعاد بیان‌شده به‌نوعی مراحل مطالعه در این زمینه‌اند که خروجی هر مرحله، ورودی مرحلهٔ بعدی محسوب می‌شود [۱۹]. به این ترتیب که در پژوهش‌های مربوط به حمل‌ونقل مواد خطرناک پس از شناخت خطرها و مطالعات آیین‌نامه‌ای ریسک‌های موجود در مسیرهای حمل مواد خطرناک محاسبه می‌شود. از ریسک محاسبه‌شدهٔ مسیرها در مدل‌های انتخاب مسیر بهینه برای حمل مواد خطرناک استفاده می‌شود و در نهایت با توجه به مسیرهای بهینه یا بحرانی برای حمل مواد خطرناک در طراحی شبکه استفاده می‌شود، به این صورت که مسیرهایی در شبکه برای حمل مواد خطرناک انتخاب یا ساخته شوند که ریسک آنها را به حداقل برسانند [۱۸].

همچنین با توجه به اینکه در بیشتر موارد محل تولید، انبار و مصرف این مواد فاصلهٔ زیادی از هم دارند و حمل آنها به مکان‌های دوردست ضرورت دارد، رعایت نکردن استانداردهای انبارداری و حمل‌ونقل مواد خطرناک به‌دلیل نشتی، انفجار، مسمومیت و حوادث ناگوار دیگر، سبب وارد شدن زیان‌های اقتصادی زیاد و خسارات زیست‌محیطی و جانی جبران‌ناپذیری می‌شود که این موضوع، سبب تفاوت ماهیت و پیامدهای ناگوار این حوادث با بقیهٔ حوادث جاده‌ای شده است. برای مثال در بندر تیانجین چین در ۱۲ آگوست ۲۰۱۵، وقوع چند انفجار در انبار ذخیرهٔ مواد خطرناک، ۱۷۳ نفر کشته، ۸ نفر ناپدید، ۷۹۷ نفر مصدوم و بیش از ۷۰ میلیارد دلار خسارت مالی و زیست‌محیطی بر جای گذاشت [۲] یا در ایران در تیرماه ۱۳۸۳ در محور بم- زاهدان یک دستگاه تریلر حامل بنزین با چند دستگاه اتوبوس و کامیون برخورد کرد که سبب کشته شدن ۷۱ نفر و زخمی شدن ۱۰۶ نفر شد. به‌طور کلی از این‌دست حوادث، موارد متعددی در ایران و دیگر نقاط جهان ثبت شده است [۳].

هدف این پژوهش آن است که با بهره‌گیری از مفاهیم تصمیم‌گیری چندمعیاره و الگوریتم‌های بهینه‌سازی و همچنین رویکرد فازی، مدلی برای مسیریابی بهینهٔ سوخت‌رسانی معرفی شود. بدین منظور سه تابع هدف شامل کمینه کردن هزینه یا زمان سفر، کمینه کردن ریسک حمل‌ونقل و کمینه کردن آلودگی زیست‌محیطی مدنظر قرار گرفته و مسئلهٔ مسیریابی بهینهٔ سوخت‌رسانی از انبارهای توزیع به جایگاه‌های عرضه بنزین به‌منزلهٔ مسئله‌ای چندهدفه در نظر گرفته شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند به تصمیم‌گیری برنامه‌ریزان در زمینهٔ کاهش هزینه، خطر حمل‌ونقل و کاهش آلودگی کمک شایانی کند.

پیشینهٔ پژوهش

اولین گام در کنترل حوادث حمل‌ونقل مواد خطرناک، اجرای کامل و گام‌به‌گام مدیریت ریسک است. برای اجرای کامل مدیریت ریسک در حمل‌ونقل مواد خطرناک باید ضمن ارائهٔ مدلی جامع و بدیع، ابعاد اجرایی و شرایط اجرای مدل مدنظر قرار گیرد و چالش‌ها و پیچیدگی‌های جهان واقعی در آن لحاظ شود. در بسیاری از تعاریف، ریسک به‌منزلهٔ مفهومی دوبعدی دربرگیرندهٔ وقوع

هر دو احتمال خطر و پیامدهای آن است. افزون‌بر این، مفاهیم دیگر شامل تشخیص شکست زمان هزینه و مدت بهبود نیز برای تعیین ریسک مدنظر قرار گرفته‌اند [۲۰].

کهفی و توکلی مقدم مدلی برای مسیریابی وسایل نقلیهٔ چندانباره مبتنی بر کاهش ریسک معرفی کرده و سپس با به‌کارگیری الگوریتم خفاش چندهدفه و NSGA-II مسیرهای بهینه را استخراج کردند و با مقایسهٔ نتایج این دو الگوریتم برتری الگوریتم خفاش چندهدفه را تأیید کردند [۱۱]. جلیلی‌بال و همکاران با در نظر گرفتن پنجرهٔ زمانی و عوامل زیست‌محیطی از الگوریتم‌های NSGA-II و بهینه‌سازی چندهدفه میرایی ارتعاشات[1] برای حل مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیهٔ حمل مواد سوختی استفاده کردند و اثربخشی و کارایی هر دو الگوریتم را به‌خصوص در مسائل بزرگ‌مقیاس در زمان برازش کوتاه نشان دادند [۱۰]. زرو و همکاران برای حل مسئلهٔ حمل‌ونقل مواد خطرناک تک‌انباره با توابع هدف فازی و قطعی، الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر چندهدفه[2] را به‌کار گرفتند و برای تحویل سوخت بنزین از یک انبار به چندین جایگاه سوخت بده- بستانی میان تابع هدف حداقل کردن هزینه و ریسک برقرار کردند [۲۱].

دو و همکاران به‌کمک برنامه‌ریزی فازی دوسطحی مدلی برای مسئلهٔ مسیریابی وسیلهٔ نقلیهٔ حمل مواد خطرناک ارائه کردند و نتایج بررسی آنها اثربخشی مدل پیشنهادی و چهار الگوریتم فراابتکاری به‌کاررفته برای حل مدل را تأیید کردند [۲]. بولا و همکاران از الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر برای حل مسئلهٔ مسیریابی حمل‌ونقل مواد خطرناک استفاده کرده و کارایی و کیفیت آن را در مقایسه با روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تأیید کردند [۱].

تسلیمی و همکاران مدلی جامع برای طراحی شبکهٔ حمل‌ونقل مواد خطرناک دوسطحی ارائه کردند که در سطح اول سیاستگذاران در پی حداقل کردن ریسک حمل‌ونقل با رویکرد توزیع عادلانهٔ ریسک و در سطح دوم شرکت‌های حمل‌ونقل مواد خطرناک در پی کمینه‌سازی هزینهٔ سفر بودند. نتایج این پژوهش نشان داد که برای مسائل بزرگ‌مقیاس، رویکرد ابتکاری آزمندانه راه حل‌های خوبی در زمان پردازش منطقی به دست می‌دهد [۱۷]. صفارزاده و همکاران با قطعه‌بندی مسیرهای استان مازندران، ریسک قطعات مختلف را توسط مقایسه‌های زوجی کمی‌سازی و محاسبه کرده و سپس قطعات بحرانی و سطح خطرپذیری محورهای استان برای حمل مواد خطرناک را تعیین و ارزیابی کردند [۱۶].

اوزسیلان و همکاران مدل کاهش ریسک مبتنی بر نرم‌افزار GIS را برای مسئلهٔ مسیریابی مواد خطرناک در شهر غازی‌عینتاب ترکیه به‌کار گرفتند و دریافتند که این مدل می‌تواند به سیاستگذاران در ارزیابی مسیرهای ممکن برای به حداقل رساندن خسارات احتمالی کمک کند [۱۴]. اسفنده و همکاران در پژوهشی با نام برابری و مقبولیت اجتماعی در مسیریابی حمل‌ونقل مواد خطرناک چندمحصولی در نواحی شهری، از یک مدل برنامه‌ریزی خطی کسری استفاده کردند که مجموعه‌ای از محدودیت‌های خطی را برای توزیع مناسب ریسک بین مناطق جمعیتی ترکیب می‌کند و سطح کلی ریسک را کمتر از آستانهٔ مقبولیت اجتماعی قرار می‌داد. نتایج تحقیق مفید بودن این شیوه را برای تصمیم‌گیرندگان تأیید کرد [۴].

گل و همکاران نوعی مدل ارزیابی ریسک مبتنی بر اعداد فازی را برای مسیرهای یک شرکت حمل‌ونقل نفت ارائه کردند [۶]. قلعه و همکاران با هدف معرفی الگوی ارزیابی خطر ایمنی حمل‌ونقل ناوگان جاده‌ای مواد خطرناک و طبقه‌بندی کامیون‌ها با رویکرد ایمنی تحقیقی انجام دادند. در این تحقیق ابتدا عوامل مؤثر در ایجاد ریسک ایمنی کامیون‌های نفتی جاده با استفاده از روش تحلیل خطر شغلی شناسایی و پس از آن، از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی به‌منظور وزن‌گیری فاکتورهای تعیین‌شده استفاده شد [۵]. جباری و همکاران حاشیهٔ ایمن و حاشیهٔ بقای حمل‌ونقل مواد خطرناک را با استفاده از روش شاخص تماس شیمیایی تعیین کردند [۹].

بیان مسئله و مدل پیشنهادی

مسئلهٔ بررسی‌شده در این تحقیق، سوخت‌رسانی به یکی از شبکه‌های توزیع سوخت بنزین در استان بوشهر است. تابع هدف این مسئله چندهدفه و شامل سه تابع هدف است که در تابع هدف اول، حداقل‌سازی هزینه یا زمان سفر (ملاحظات اقتصادی) مدنظر

1. MOVDO
2. MOSP

است. در تابع هدف دوم در پی حداقل‌سازی ریسک مسیر (ملاحظات ایمنی) هستیم؛ ریسک‌های تحت بررسی برای کمینه‌سازی در این تابع هدف شامل سه نوع ریسک جمعیتی (جمعیت در معرض خطر در اثر وقوع حادثه)، ریسک زیست‌محیطی (میزان آسیب احتمالی به جنگل‌ها، مراتع، کشتزارها، دریا، رودخانه‌ها و زیستگاه‌های جانوری در اثر وقوع حادثه) و همچنین ریسک ابنیه (شدت آسیب‌دیدگی ابنیه در مسیر شامل پل‌ها، تونل‌ها و دیگر ابنیهٔ موجود در اثر وقوع حادثه) است. در صورت بی‌توجهی و نبود برنامه‌ریزی برای حداقل‌سازی این ریسک‌ها و بروز حادثه، فجایع انسانی و زیست‌محیطی و همچنین آسیب‌های جدی به ابنیهٔ واقع در مسیر دور از انتظار نخواهد بود. در نهایت در تابع هدف سوم، بر کمینه‌سازی انتشار آلودگی زیست‌محیطی از وسایل نقلیه در مسیرها تأکید می‌شود. شبکهٔ راه‌های استان که مشخصات آن در بخش یافته‌های پژوهش بیان شده است، در مجموع دارای ۵۹ گره مشتمل بر سه انبار توزیع یا تأمین‌کنندهٔ بنزین(گره‌های مبدأ)، ۳۵ جایگاه عرضهٔ سوخت (گره‌های مقصد) و ۲۱ گره میانی که دارای جایگاه سوخت نیستند و نیاز به سرویس‌دهی ندارند است. همچنین تعداد مسیرهای بین انبارها و جایگاه‌های سوخت در این مسئله ۱۱۷ مسیر است. همچنین مدل پیشنهادی مسئله دارای مفروضات زیر است:

۱. هر مسیر شامل ترتیبی از کمان‌های موجود بین دو گره است؛ ۲. وسایل نقلیه کار خود را از انبار توزیع آغاز و به‌سمت گره‌های متقاضی سوخت حرکت می‌کنند و سپس به انبار توزیع برمی‌گردند؛ ۳. در یک مرتبه بازدید تقاضای گره برآورده می‌شود؛ ۴. وسایل نقلیه همگن‌اند و از نظر زمان محدودیت دارند؛ ۵. چند انبار توزیع برای برآورده کردن تقاضای گره‌ها وجود دارد و فقط یک انبار خاص برای سرویس‌دهی به گره‌ها تخصیص نمی‌یابد؛ ۶. تعداد وسایل نقلیهٔ موجود در هر انبار سقف مشخصی دارد و ممکن است از همهٔ آنها استفاده نشود. همچنین اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تعریف‌شده در مدل به‌شرح جدول‌های ۱ تا ۳ است:

جدول ۱. اندیس‌های تعریف‌شده در مدل

اندیس‌ها	تعریف
I	شمارندهٔ انبار i=1,….,n
J	شمارندهٔ گره(مشتریان یا جایگاه‌های سوخت) j=1,….,m
K	شمارندهٔ وسیلهٔ نقلیه k=1,….,k

جدول ۲. پارامترهای تعریف‌شده در مدل

پارامترها	تعریف
t_{ijk}	فاصلهٔ زمانی حرکت بین گره i و گره j توسط وسیلهٔ نقلیهٔ k
R_{ijk}	ریسک حرکت بین گره i و گره j توسط وسیلهٔ نقلیهٔ k
CO_{ijk}	مقدار آلایندگی انتشاریافته توسط وسیلهٔ نقلیهٔ k بین گره i و گره j
T_K	حداکثر مدت زمان مجاز برای حرکت وسیلهٔ نقلیهٔ k
Y_i	حداکثر تعداد وسیلهٔ نقلیهٔ در انبار i
W_{jk}	حداکثر مدت زمان تحویل تقاضا برای گره j توسط وسیلهٔ نقلیهٔ k
d_j	تقاضای گره j
Cap_k	ظرفیت حمل وسیلهٔ نقلیهٔ k

جدول ۳. متغیرهای تعریف‌شده در مدل

متغیرها	تعریف
q_{ijk}	اگر حرکت بین گره i و گره j توسط وسیلهٔ نقلیهٔ k انجام گیرد ۱ و درغیر این‌صورت ۰
Z_{ij}	اگر گره i به گره j اختصاص یابد ۱ در غیراین‌صورت ۰
U_{iK}	متغیر کمکی برای حذف زیر تور

مدل ریاضی پیشنهادی به‌شرح زیر است:

$$Z_1 = \text{Min} \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{k} t_{ijk}q_{ijk} \quad (۱)$$

$$Z_2 = \text{Min} \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{k} R_{ijk}q_{ijk} \quad (۲)$$

$$Z_3 = \text{Min} \sum_{j=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{k} CO_{ijk} q_{ijk} \quad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{k} q_{ijk} = 1 \qquad \forall_j \in j \quad (۴)$$

$$\sum_{j=1}^{m} W_{jk} + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} t_{ijk} q_{ijk} \leq T_K \qquad \forall_k \in k \quad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} d_j q_{ijk} \leq Cap_k \quad (۶)$$

$$U_{ij} - U_{iK} + K\, q_{ijk} \leq K\text{-}1 \qquad \forall_{l,j} \in j, k \in k \quad (۷)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} q_{ijk} \leq 1 \quad (۸)$$

$$\sum_{j=1}^{m} q_{ijk} - q_{jik} = 0 \qquad \forall_i \in j \cup i, k \in k \quad (۹)$$

$$-Z_{ij} + \sum_{j=1}^{m} (U_{iK} + U_{iK}) \leq 1 \qquad \forall_j \in j, i \in i, k \in k \quad (۱۰)$$

$$\sum_{j=1}^{m} q_{ijk} \leq Y_i \qquad \forall_i \in j \cup i, k \in k \quad (۱۱)$$

$$q_{ijk}, Z_{ij} \in 0 \text{ یا } 1 \quad (۱۲)$$

$$U_{iK} \geq 0 \quad (۱۳)$$

رابطهٔ ۱ تابع هدف اول مسئله را نشان می‌دهد و بیانگر کمینه‌سازی زمان سفر طی‌شده است. برای محاسبهٔ زمان سفر در یک مسیر توسط وسیله نقلیهٔ k از رابطهٔ ۱۴ استفاده شده است:

$$t_{ij} = \frac{L_{ij}}{V_{ij}} \quad (۱۴)$$

در این رابطه t_{ij} زمان سفر مسیرij، L_{ij} طول مسیر ij و V_{ij} سرعت متوسط در مسیر ij است [۱۲].

رابطهٔ ۲ تابع هدف دوم مسئله را نشان می‌دهد و بیانگر کمینه‌سازی کل ریسک مسیر طی‌شده است. برای تعیین مقدار ریسک از ترکیب دو پارامتر احتمال وقوع حادثه و شدت پیامد آن استفاده می‌شود. بدین ترتیب ریسک کلی هر یک از مسیرها براساس رابطهٔ ۱۵ محاسبه می‌شود:

$$R_{ij} = (P_{ij} \left(W_1 PR_{ij} + W_2 ER_{ij} + W_3 IR_{ij} \right) \quad (۱۵)$$

R_{ij} ریسک کلی مسیرij، P_{ij} احتمال وقوع حادثه در مسیر ij، PR_{ij} ریسک جمعیتی در مسیر ij، ER_{ij} ریسک زیست‌محیطی در مسیر ij و IR_{ij} ریسک ابنیه در مسیر ij است. W_1 و W_2 و W_3 به‌ترتیب میزان اهمیتی (وزن) است که تصمیم‌گیرنده برای ریسک‌های جمعیتی، زیست‌محیطی و ابنیه در نظر گرفته است. برای محاسبهٔ حد اهمیت (وزن) هر کدام از این ریسک‌ها از روش بهترین- بدترین فازی[1] استفاده می‌شود که در قسمت روش پژوهش به‌طور مشروح توضیح داده خواهد شد.

با توجه به اینکه داده‌های تاریخی برای محاسبهٔ فراوانی حوادث مواد خطرناک و همچنین داده‌های مستخرج از سیستم GIS کشور برای محاسبهٔ شدت حادثه کامل، به‌روز و دقیق نیستند و حصول دقیق مقادیر هر یک از ریسک‌ها به‌طور کمّی دشوار است، از تئوری مجموعه‌های فازی مثلثی برای محاسبهٔ ریسک مسیرها استفاده می‌شود [۱۸]. برای محاسبهٔ ریسک کلی مسیرها از نظر خبرگان استفاده شد؛ بدین ترتیب که پرسشنامه توسط نه کارشناس ادارات کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای، حفاظت محیط زیست و راه و شهرسازی به‌کمک اعداد متناظر با متغیرهای کلامی برای هر کدام از ریسک‌ها و مسیرها به‌طور جداگانه تکمیل و با تبدیل این اعداد به اعداد فازی مثلثی، میانگین نظر کارشناسان محاسبه و به‌کمک رابطهٔ ۱۶ به اعداد قطعی تبدیل شد.

$$R_{(\tilde{a}_i)} = \frac{l_i + 4m_i + u_i}{6} \quad (۱۶)$$

در مرحلهٔ بعد ماتریس ریسک کلی مسیرها مطابق رابطهٔ ۱۵ محاسبه و تشکیل شد.

1. Fuzzy Best-Worst Method

رابطهٔ ۳ بیانگر تابع هدف سوم است که مربوط به کمینه‌سازی مقدار آلایندگی انتشاریافته از وسایل نقلیه در مسیر است. برای محاسبهٔ آن با توجه به عوامل متعدد تأثیرگذار در محاسبهٔ مقدار آلودگی ایجادشده توسط وسایل نقلیه از قبیل الگوی رانندگی، حجم ترافیک، شیب مسیر، عرض مسیر، دمای هوا، رطوبت هوا، سرعت خودروها، سن خودروها، فناوری به‌کارگرفته‌شده در موتور و تجهیزات کاهندهٔ آلایندگی و غیره و در نتیجه ناممکن بودن اندازه‌گیری همهٔ عوامل مؤثر بر انتشار آلاینده‌ها و دسترسی نداشتن به اطلاعات دقیق دربارهٔ این عوامل از نظر خبرگان استفاده شد. بدین منظور پرسشنامه توسط سه کارشناس ادارهٔ کل حفاظت محیط زیست به‌کمک اعداد متناظر با متغیرهای کلامی برای هر کدام از مسیرها جداگانه تکمیل و در نهایت با تبدیل این اعداد به اعداد فازی مثلثی، میانگین نظر سه کارشناس به‌کمک رابطهٔ ۱۶ به اعداد قطعی تبدیل شد.

رابطهٔ ۴ تضمین می‌کند که هر گره تنها به یک انبار و یک وسیلهٔ نقلیه تخصیص پیدا می‌کند.

رابطهٔ ۵ تضمین می‌کند که مدت زمان حرکت یک وسیله از بیشینهٔ زمان مجاز آن کمتر باشد.

رابطهٔ ۶ تضمین می‌کند که تقاضای یک گره از ظرفیت وسیلهٔ نقلیهٔ k بیشتر نباشد. رابطهٔ ۷ مربوط به حذف زیر تور است. رابطهٔ ۸ تضمین می‌کند که هر وسیله تنها یک مسیر را طی کند. رابطهٔ ۹ تضمین می‌کند که اگر وسیله به گره وارد شود حتماً باید از آن خارج شود. رابطهٔ ۱۰ تضمین می‌کند که هر گره به انباری اختصاص پیدا کند که وسیلهٔ نقلیهٔ سرویس‌دهندهٔ آن گره از انبار خارج شده باشد. رابطهٔ ۱۱ تضمین‌کنندهٔ شرط حداکثر تعداد وسیلهٔ نقلیه در هر انبار است. رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ نیز جنس متغیرها را نشان می‌دهند [۱۰، ۱۱].

روش پژوهش

با توجه به اینکه مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیه جزو مسائل غیر چندجمله‌ای سخت[1] است و استفاده از رویکردهای دقیقی مانند برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی، برنامه‌ریزی عدد صحیح و غیره برای حل مسائل با پیچیدگی زیاد به‌خصوص در ابعاد بزرگ برای به‌دست آوردن جواب بهینه در زمان منطقی و مناسب غیرممکن است، از رویکرد الگوریتم فراابتکاری چندهدفه مبتنی بر شدت پارتو۲[2] که به‌اختصار SPEA2 نامیده می‌شود، برای حل مسئله استفاده شد. در این پژوهش برای وزن‌دهی به ریسک‌ها و توابع هدف روش جدید FBWM معرفی‌شده در سال ۲۰۱۷ به‌کار گرفته شد [۷] که این دو روش در ادامه به‌طور مشروح بررسی می‌شود.

روش BWM فازی

روش BWM در سال ۲۰۱۵ معرفی شد [۱۷]. سپس شکل فازی این روش در سال ۲۰۱۷ برای حل مسائل تحت شرایط فازی ارائه شد [۷]. در این روش بهترین و بدترین شاخص توسط تصمیم‌گیرنده مشخص می‌شود و سپس مقایسه‌های زوجی بین این دو شاخص و دیگر شاخص‌ها صورت می‌گیرد و در مرحلهٔ بعد یک مسئلهٔ حداکثر حداقل برای تعیین وزن شاخص‌ها مدل‌سازی و حل می‌شود. همچنین به‌منظور بررسی اعتبار مقایسه‌های صورت‌گرفته نرخ سازگاری محاسبه می‌شود. مراحل این روش به‌شرح زیر است:

مرحلهٔ اول: مجموعه‌ای از معیارهای تصمیم‌گیری $\{c_1, c_2, \ldots, c_n\}$ تعیین می‌شود.

مرحلهٔ دوم: بهترین معیار c_B و بدترین معیار c_W توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود.

مرحلهٔ سوم: بردار ارجحیت فازی بهترین معیار نسبت به بقیهٔ معیارها $\tilde{A}_{B=\{\tilde{a}_{B1}, \tilde{a}_{B2}, \ldots, \tilde{a}_{Bn}\}}$ مشخص می‌شود و در آن $\tilde{a}_{Bj}$ برتری فازی بهترین معیار c_B بر معیار j است.

مرحلهٔ چهارم: بردار ارجحیت فازی دیگر معیارها نسبت به بدترین معیار $\tilde{A}_{W=\{\tilde{a}_{1w}, \tilde{a}_{2w}, \ldots, \tilde{a}_{3w}\}}$ مشخص می‌شود.که در آن $\tilde{a}_{wj}$ برتری فازی معیارi بر بدترین معیار c_W است.

1. Np-Hard
2. Strength Pareto Evolutionary Algorithm2

مرحلهٔ پنجم: وزن بهینهٔ فازی محاسبه می‌شود. وزن بهینهٔ فازی برای هر معیار وزنی است که در آن برای هر زوج فازی $\tilde{w}_B/\tilde{w}_j$ و $\tilde{w}_j/\tilde{w}_w$ رابطهٔ $\tilde{w}_B/\tilde{w}_j = \tilde{a}_{Bj}$ و $\tilde{w}_j/\tilde{w}_w = \tilde{a}_{jw}$ برقرار باشد که برای برقراری این شرایط برای همهٔ j ها باید راه حلی بیابیم که در آن حداکثر تفاوت‌های مطلق یعنی $\left|\tilde{w}_B/\tilde{w}_j - \tilde{a}_{Bj}\right|$ و $\left|\tilde{w}_j/\tilde{w}_w - \tilde{a}_{jw}\right|$ برای همهٔ j ها حداقل باشد. بنابراین ما می‌توانیم مسئلهٔ بهینه‌سازی مقید را برای تعیین وزن‌های بهینه فازی به‌صورت رابطهٔ ۲۰ مدل‌سازی کنیم:

$$\text{Min}\max_j\left\{\left|\tilde{w}_B/\tilde{w}_j - \tilde{a}_{Bj}\right|, \left|\tilde{w}_j/\tilde{w}_w - \tilde{a}_{jw}\right|\right\}$$

$$\text{s.t.} = \begin{cases} \sum_{j=1}^{n} R(\tilde{w}_j) = 1 \\ l_j^w \le m_j^w \le u_j^w \\ l_j^w \ge 0 \\ j = 1,2,\ldots,n \end{cases} \qquad (۱۷)$$

که در آن $\tilde{w}_B = (l_B^w, m_B^w, u_B^w)$ *و* $\tilde{w}_j = (l_j^w, m_j^w, u_j^w)$ *و* $\tilde{w}_w = (l_W^w, m_W^w, u_W^w)$ *و* $\tilde{a}_{Bj} = (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj})$ *و* $\tilde{a}_{jw} = (l_{jW}, m_{jW}, u_{jW})$ *است.* این مسئله می‌تواند به مسئلهٔ بهینه‌سازی مقید غیرخطی زیر تبدیل شود:

$$\text{Min}\tilde{\xi}$$

$$\text{s.t.} = \begin{cases} \left|\tilde{w}_B/\tilde{w}_j - \tilde{a}_{Bj}\right| \le \tilde{\xi} \\ \left|\tilde{w}_j/\tilde{w}_w - \tilde{a}_{jw}\right| \le \tilde{\xi} \\ \sum_{j=1}^{n} R(\tilde{w}_w) = 1 \\ l_j^w \le m_j^w \le u_j^w \\ l_j^w \ge 0 \\ j = 1,2,\ldots,n \end{cases} \qquad (۱۸)$$

که در آن $\tilde{\xi}=(l^{\xi}, m^{\xi}, u^{\xi})$ است. پس از حل مدل بالا، مقادیر به‌دست‌آمده به‌کمک رابطهٔ ۱۶ از اعداد فازی به اعداد قطعی تبدیل می‌شود. در مرحلهٔ بعد برای کنترل مقدار سازگاری و اطمینان از مقایسه‌های انجام‌گرفته از نرخ سازگاری (CR) استفاده می‌شود. شاخص سازگاری (CI) متناظر با واژه‌های کلامی مطابق جدول ۴ است.

جدول ٤. شاخص سازگاری (CI) متناظر با واژه‌های کلامی

واژه‌های کلامی	برابر	کمی مرجح	نسبتاً مرجح	خیلی مرجح	کاملاً مرجح
$\tilde{a}_{BW}$	(۱و۱و۱)	(۱،۵و۱و۰،۶۶۷)	(۲،۵و۲و۱،۵)	(۳،۵و۳و۲،۵)	(۴،۵و۴و۳،۵)
شاخص سازگاری	۳	۳،۸۰	۵،۲۹	۶،۶۹	۸،۰۴

در صورتی که $\tilde{a}_{BW}$ به‌دست‌آمده معادل جدول ۴ باشد، شاخص سازگاری متناظر با آن از این جدول استخراج می‌شود و در غیر این‌صورت به کمک رابطهٔ ۱۹ که یک معادلهٔ درجه دوم است، شاخص سازگاری به‌دست می‌آید.

$$\xi^2 - (1+2u_{BW})\xi + \left(u_{BW}^2 - u_{BW}\right) = 0$$

در این رابطه u_{BW} حد بالای ارجحیت بهترین معیار نسبت به بدترین معیار است. در نهایت با تقسیم ξ به‌دست‌آمده بر شاخص سازگاری، نرخ سازگاری به‌دست می‌آید که هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، مقایسه‌ها از ثبات و اطمینان بیشتری برخوردار است [۷].

الگوریتم SPEA2

این الگوریتم که نسخهٔ ارتقایافتهٔ الگوریتم تکاملی مبتنی بر شدت پارتو است، برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه توسط زیتلر و همکاران ارائه شد [۲۱]. با توجه به اینکه این الگوریتم یکی از بهترین الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه به‌دلیل توزیع یکنواخت، دقت و سرعت همگرایی است از این الگوریتم در این پژوهش استفاده شده است [۸]. در مسائل چندهدفه به‌جای بهینه‌سازی یک تابع هدف، چند تابع هدف همزمان بهینه می‌شوند. بنابراین در این حالت به‌طور معمول، مسئله دارای بیش از یک جواب بهینه است که به آنها جواب‌های بهینهٔ پارتو (نامغلوب) می‌گویند. این الگوریتم برای هدایت و انتقال جواب‌ها به‌طرف مرز بهینهٔ پارتو طراحی شده است که مراحل اصلی آن به‌شرح زیر است:

۱. تولید جواب (جمعیت) اولیه p_0 و ایجاد حافظهٔ بیرونی (آرشیو) خالی. این آرشیو برای ذخیره و نگهداری اعضای نامغلوب یا جواب‌های با کیفیت مطلوب است که به‌طور معمول اندازهٔ آن برابر اندازهٔ جمعیت است. بنابراین این الگوریتم از یک راهبرد نخبه‌گرایی برای انتخاب جواب‌های باکیفیت برای تولید نسل‌های آینده استفاده می‌کند؛ ۲. مقدار برازندگی هر یک از جواب‌های جمعیت فعلی و آرشیو (جواب‌های نامغلوب پارتو) محاسبه می‌شود؛ ۳. همهٔ جواب‌های نامغلوب از جمعیت فعلی و آرشیو در آرشیو بعدی با هم ادغام می‌شوند و در صورتی که جواب‌های نامغلوب بیشتر از اندازهٔ آرشیو باشد، جواب‌های نامغلوب اضافی حذف می‌شود؛ ۴. به کمک عملگر انتخاب تورنمنت باینری والدها را از میان جمعیت ادغام‌شدهٔ موجود در آرشیو برای آمیزش آنهایی که برازندگی بیشتری دارند انتخاب می‌کنیم؛ ۵. عملگرهای تقاطع[1] و جهش[2] را روی والدین انتخاب‌شده در مراحل قبلی برای تولید جمعیت جدید اعمال می‌کنیم. مراحل ۲ تا ۶ این الگوریتم تا برآورده شدن شرط توقف تکرار می‌شود و خروجی این الگوریتم همان آرشیو نهایی است [۲۰، ۹].

بحث و یافته‌های پژوهش

برای ارزیابی مدل ارائه‌شده و به‌دست آوردن وزن توابع هدف از روش بهترین- بدترین استفاده شد. همچنین برای حل مدل از نرم‌افزار GAMS و MATLAB بهره گرفته شد. در این تحقیق برای تعیین وزن(ضریب اهمیت) هر کدام از سه معیار ریسک جمعیتی (C_1) زیست‌محیطی(C_2) و ابنیه (C_3) پرسشنامهٔ مقایسه‌های زوجی بین سه کارشناس ادارات کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای، حفاظت محیط زیست و راه و شهرسازی توزیع شد. آنها بهترین معیار را ریسک جمعیتی (c_1) و بدترین معیار را ریسک ابنیه (c_3) تشخیص دادند. پس از به‌دست آوردن میانگین نظر آنها بردار ارجحیت فازی بهترین معیار نسبت به معیارهای دیگر ($\tilde{A}_B$) مطابق جدول ۵ مشخص شد.

جدول ۵. ارجحیت فازی بهترین معیار نسبت به معیارهای دیگر

معیار	c_1	c_2	c_3
بهترین معیار(c_1)	(۱،۱،۱)	(۱،۳۵۷و۱،۸۱۷و۲،۳۵۹)	(۲،۷۹۷و۳،۳۰۲و۳،۸۰۶)

در مرحلهٔ بعد ارجحیت فازی معیارهای دیگر نسبت به بدترین معیار($\tilde{A}_W$) به‌صورت جدول۶ به‌دست آمد.

جدول ٦. ارجحیت فازی دیگر معیارها نسبت به بدترین معیار

معیار	بدترین معیار(c_3)
c_1	(۲،۷۹۷و۳،۳۰۲و۳،۸۰۶)
c_2	(۱،۱۴۵و۱،۵۸۷.و۲،۱۰۹)
c_3	(۱،۱،۱)

1. Crossover
2. Mutation

برای محاسبهٔ وزن فازی معیارها مدل بهینه‌سازی مقید غیرخطی را مطابق رابطهٔ ۱۸ تشکیل می‌دهیم.

$$\text{Min}\tilde{\xi}$$

$$\text{s.t.} = \begin{cases} |(l_1/u_2)-1.357| \le \tilde{\xi};\ |(m_1/m_2)-1.817| \le \tilde{\xi};\ |(u_1/l_2)-2.359| \le \tilde{\xi} \\ |(l_1/u_3)-2.797| \le \tilde{\xi};\ |(m_1/m_3)-3.302| \le \tilde{\xi};\ |(u_1/l_3)-3.806| \le \tilde{\xi} \\ |(l_2/u_3)-1.145| \le \tilde{\xi};\ |((m_2/m_3))-1.587| \le \tilde{\xi};\ |(u_2/l_3)-2.109| \le \tilde{\xi} \\ 0.167*l1+0.668*m1+0.167*u1+0.167*l2+0.668*m2+ \\ 0.167*u2+0.167*l3+0.668*m3+0.167*u3=1 \\ l_1 \le m_1 \le u_1 \\ l_2 \le m_2 \le u_2 \\ l_3 \le m_3 \le u_3 \\ l_1 \ge 0; l_2 \ge 0; l_3 \ge 0 \end{cases}$$

این مدل در نرم‌افزار (LINGO) اجرا شد و نتایج زیر به‌دست آمد:

w_1=(0.485,0.555,0.555); w_2=(0.225,0.289,0.332); w_3=(0.150,0.171,0.180)

$\tilde{\xi}$=(0.105,0.105,0.105)

در مرحلهٔ بعد این نتایج با استفاده از رابطهٔ ۱۶ به اعداد قطعی تبدیل شدند و اوزان بهینه w1=(0.54);w2=(0.29);w3=(0.17) حاصل شد. سپس به‌کمک رابطهٔ ۱۹، شاخص سازگاری معادل ۶/۷۲۴ به‌دست آمد. بنابراین نرخ سازگاری برابر است با: $\frac{0.1.5}{6.724}$ =0.015 که با توجه به اینکه این نرخ به عدد صفر نزدیک است مقایسه‌های صورت‌گرفته دارای اطمینان و ثبات است.

به‌دلیل غیرقطعی بودن برخی از پارامترهای مدل، به‌شکل تصادفی در بازهٔ مربوط تولید می‌کنیم. به‌علت در دسترس نبودن بعضی از اطلاعات دقیق اعداد مربوط به آنها به‌شکل تقریبی تخمین زده شد که در مدل جایگذاری شده است. از این‌رو برای حل مدل پژوهش از الگوریتم شدت پارتو برای بهینه‌سازی بهره برده شد، زیرا مسئلهٔ پژوهش از نوع NP-Hard است و روش‌های دقیق برای این‌گونه مسائل کارایی ندارند و نیز مسئلهٔ پژوهش از نوع مسائل گسستهٔ ترکیبی است. برای تنظیم پارامترهای الگوریتم از روش تاگوچی استفاده شد و چهار پارامتر تعداد جمعیت اولیه، تعداد اعضای آرشیو، ضریب تقاطع و ضریب جهش مطابق جدول ۷ تنظیم شد:

جدول ۷. نتایج تنظیم پارامترهای الگوریتم SPEA2 برای حل مسئله

نام پارامتر	مقدار پارامتر
تعداد جمعیت اولیه	۲۰
تعداد اعضای آرشیو	۴۰
ضریب تقاطع	۰/۷
ضریب جهش	۰/۳

همان‌گونه که در بخش‌های گذشته نیز بیان شد، مسئلهٔ تحت بررسی در این تحقیق به‌کمک الگوریتم SPEA2 در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۷ اعمال و اجرا شد. در جدول ۸ مشخصات گره‌های تحت بررسی در شبکهٔ راه‌های استان بوشهر نشان داده شده است.

برمبنای استفاده از روش‌های حل مورد استفاده سه جواب نامغلوب (بهینه) روی مرز پارتو مطابق جدول ۹ به‌دست آمد. به‌منظور انعطاف در مدل پیشنهادی و استفاده از نظر متخصصان، به‌کمک روش BWM فازی که در بخش قبلی توضیح داده شد، براساس نظر سه کارشناس خبره به‌ترتیب وزن‌های بهینهٔ ۰/۲۴ ، ۰/۶۰، ۰/۱۶ به توابع هدف اول تا سوم اختصاص یافت. سپس میانگین وزنی برای هر سه جواب بهینه محاسبه شد و با توجه به اینکه هر سه تابع هدف از نوع کمینه‌سازی‌اند جواب پارتو شمارهٔ ۱ به‌عنوان مسیر بهینهٔ پیشنهادی انتخاب شد که این مسیر به‌طور مشروح در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۸. مشخصات گره‌های موجود در شبکهٔ راه‌های استان بوشهر

شمارهٔ گره	نام گره	نوع گره	شمارهٔ گره	نام گره	نوع گره
۱	ماهشهر	انبار توزیع ۱	۳۱	اهرم	جایگاه سوخت
۲	بوشهر	انبار توزیع ۲	۳۲	چغادک	جایگاه سوخت
۳	بندرعباس	انبار توزیع ۳	۳۳	بوشهر	جایگاه سوخت
۴	دیلم	جایگاه سوخت	۳۴	عالیشهر	گره میانی
۵	بویرات	جایگاه سوخت	۳۵	خورموج	جایگاه سوخت
۶	گاوزرد	جایگاه سوخت	۳۶	باشی	گره میانی
۷	لیلتین	جایگاه سوخت	۳۷	چاوشی	گره میانی
۸	امام حسن	جایگاه سوخت	۳۸	محمدآباد	جایگاه سوخت
۹	گناوه	جایگاه سوخت	۳۹	درازی	گره میانی
۱۰	بندرریگ	جایگاه سوخت	۴۰	بوالخیر	جایگاه سوخت
۱۱	چهارروستایی	جایگاه سوخت	۴۱	مل گل	گره میانی
۱۲	سمیعا	گره میانی	۴۲	چارک	گره میانی
۱۳	شبانکاره	جایگاه سوخت	۴۳	ناصری	گره میانی
۱۴	آبپخش	جایگاه سوخت	۴۴	کاکی	جایگاه سوخت
۱۵	کره بند	گره میانی	۴۵	شهنیاء	گره میانی
۱۶	سه‌راه گوابین	جایگاه سوخت	۴۶	سه‌راه کناری	گره میانی
۱۷	چم تنگ	گره میانی	۴۷	آبدان	گره میانی
۱۸	سعدآباد	جایگاه سوخت	۴۸	سجادیه	جایگاه سوخت
۱۹	هلپه ای	گره میانی	۴۹	دیر	جایگاه سوخت
۲۰	دالکی	جایگاه سوخت	۵۰	دوراهک	جایگاه سوخت
۲۱	نظرآقا	گره میانی	۵۱	کنگان	جایگاه سوخت
۲۲	برازجان	جایگاه سوخت	۵۲	نخل غانم	جایگاه سوخت
۲۳	جتوط	گره میانی	۵۳	سیراف	جایگاه سوخت
۲۴	گزبلند	جایگاه سوخت	۵۴	شیرینو- نخل تقی	جایگاه سوخت
۲۵	شیف	گره میانی	۵۵	بیدخون	جایگاه سوخت
۲۶	احمدی	جایگاه سوخت	۵۶	چاه مبارک	گره میانی
۲۷	بنداروز	جایگاه سوخت	۵۷	انارستان	گره میانی
۲۸	تنگ ارم	جایگاه سوخت	۵۸	ریز	گره میانی
۲۹	دهرود سفلی	جایگاه سوخت	۵۹	جم	جایگاه سوخت
۳۰	کلمه	گره میانی			

جدول ۹. جواب‌های بهینه (نامغلوب) پیشنهادی الگوریتم SPEA2

شمارهٔ جواب پارتو	مقدار تابع هدف اول (زمان سفر مسیر)	مقدار تابع هدف دوم (ریسک مسیر)	مقدار تابع هدف سوم (آلودگی زیست‌محیطی)	میانگین وزنی توابع هدف
۱	۱۵۸/۶	۷۵/۲۶	۷۴/۲۴	۹۵/۸۴
۲	۱۵۵/۹۴	۸۱/۵۸	۷۹/۵	۹۹/۸۹
۳	۱۶۹/۶۲	۷۳/۴	۷۲/۵۸	۹۷/۰۹

با بررسی این مسیر بهینه و همچنین مسیرهای دارای نقاط حادثه‌خیز و پرخطر مستخرج از ادارهٔ کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای استان و دریافت نظر کارشناسان، مشخص شد که تنها پنج مسیر طی‌شده شامل مسیر بین گره‌های شمارهٔ ۲۲-۱۴، ۱۴-۱۸، ۲۹-۳۰، ۴۵-۴۴ و ۵۴-۵۳ دارای نقاط حادثه‌خیزند که به‌دلیل نبود مسیرهای جایگزین مناسب، توسط الگوریتم به‌عنوان مسیر پیشنهادی انتخاب شده است. همچنین در جدول ۱۰ مسیرهای حادثه‌خیز به‌صورت برجسته (پررنگ) نشان داده شده است.

جدول ۱۰. مسیر بهینهٔ پیشنهادی الگوریتم

شمارهٔ وسیلهٔ نقلیه	شمارهٔ انبار توزیع	کل مسیر طی‌شده	گره‌های میانی طی‌شده (بدون نیاز به سوخت‌رسانی)	جایگاه‌های سوخت‌رسانی‌شده
۱	۲	۲-۳۳	–	۳۳
۲	۱	۱-۴	-	٤
۳	۲	۲-۳۳-۲۵-۲۶-۳۱	۲۵	۲٦-۳۱
۴	۱	۱-۴-۶-۱۱	-	٦-۱۱
۵	۱	۱-٤-٦-۸-۹	-	۸-۹
۶	۲	۲-۳۳-۲۵-۲٦-۲۷-۳۱-۳۰-۲۹	۲۵-۳۰	۲۷-۲۹
۷	۳	۳-۵٦-۵۵-۵٤	۵٦	۵۵-۵٤
۸	۲	۲-۳۳-۳۲-۳٤-۳۱-۳۰-۲۹-۲۸-۲۰	۳۰-۳٤	۳۲-۲۸-۳۰
۹	۳	۳-۵٦-۵۵-۵٤-۵۳-۵۸-۵۲	۵۸-۵٦	۵۳-۵۲
۱۰	۱	۱-٤-٦-۱۱-۱۰-۱٦	-	۱۰-۱٦
11	۲	۲-۳۳-۲۵-۲٦-۳۱-۳٤-۳۷-٤۱-٤۲-٤٤-٤۵-٤۸	۲۵-۳۴-۳۷-۴۱-۴۲-۴۵	٤٤-٤۸
۱۲	۲	۲-۳۳-۳٦-۳۷-۳۹-٤۲-٤۰-٤۱-۳۸-۳۵	۳٦-۳۷-۳۹-٤۲-٤۱	٤۰-۳۸-۳۵
۱۳	۳	۳-۵٦-۵۵-۵٤-۵۳-۵۹-۵۷-۵۰	۵٦-۵۷-۵۸	۵۷-۵۰
۱۴	۱	۱-۴-۵-۷-۶-۱۱-۹-۱۰-۱۲-۱۳	۱۲	۵-۷-۱۳
۱۵	۳	۳-۵٦-۵۵-۵٤-۵۳-۵۷-۵۸-۵۲-۵۱-۵۰-۴۹	۵٦-۵۸	۵۱-٤۹
۱۶	۲	۲-۳۳-۲۵-۱۵-۱٤-۱۸	۲۵-۱۵	۱٤-۱۸
۱۷	۲	۲-۳۳-۳۲-۳۵-۳۱-۲٦-۲٤-۱۸-۱٤-۲۲	-	۲٤-۲۲

در نهایت به‌منظور نشان دادن حد امکان‌پذیری و عملی بودن روش ارائه‌شده در این پژوهش، شبکهٔ مسیرهای موجود استان بوشهر و مسیرهای پیشنهادی الگوریتم‌های استفاده‌شده براساس نرم‌افزار اطلاعات جغرافیایی مقایسه شد (شکل ۱). در شکل ۱ مسیرهای پیشنهادی به رنگ قرمز نشان داده شده است. همهٔ این مسیرهای پیشنهادی از سه جنبهٔ زمان سفر (کوتاهی مسیر)، ریسک سفر و همچنین مقدار آلودگی زیست‌محیطی نسبت به شبکهٔ راه‌های موجود (راه‌های مشکی) در کمترین مقدار قرار دارند.

شکل ۱. مقایسهٔ شبکهٔ راه‌های استان بوشهر و الگوریتم پیشنهادی

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این پژوهش، رویکرد کاملاً جدیدی برای مواجهه با عدم قطعیت مدل‌های مسیریابی ارائه شده است که با اعمال آن در مدل‌های قطعی می‌توان آنها را هرچه بیشتر به مسائل واقعی نزدیک کرد. مدل ارائه‌شده مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط شامل سه تابع هدف است. تابع هدف نخست در پی به حداقل رساندن زمان سفر (کوتاه‌ترین مسیر)، تابع هدف دوم در پی کاهش ریسک (تعیین نقاط حادثه‌خیز) و در نهایت تابع هدف سوم در پی کاهش ایجاد آلودگی زیست‌محیطی ناشی از حمل بنزین در طول مسیر است. برای حل مدل پژوهش از رویکرد تصمیم‌گیری بهترین- بدترین فازی و همچنین الگوریتم SPEA2چندهدفه بهره برده شد.

همچنین مدل ارائه‌شده در این پژوهش محدودیت‌هایی را معرفی می‌کند که از یک طرف، از کیفیت انتقال و توزیع سوخت از مراکز توزیع به جایگاه‌های سوخت اطمینان حاصل می‌کند و از طرف دیگر، کمترین نقطهٔ حادثه‌خیز را ایجاد می‌کند. افزون‌بر این، کاهش‌ها در توابع هدف مطرح‌شده مسئلهٔ پژوهش می‌تواند به‌طور مداوم به صرفه‌جویی‌های مالی در عملیات توزیع بنزین به جایگاه‌های سوخت و همچنین کاهش تأثیرات و آلودگی زیست‌محیطی منجر شود. همچنین می‌توان بخش‌های مختلف این پژوهش را با پژوهش‌های دیگر مقایسه کرد (جدول ۱۱).

جدول ۱۱. مقایسهٔ پژوهش حاضر با پژوهش‌های دیگر

منابع	نوع مسئله		وضعیت		تابع هدف حداقل‌سازی		
	مکان‌یابی	مسیریابی	قطعی	غیرقطعی	کوتاه‌ترین مسیر (زمان سفر)	میزان ریسک	آلودگی زیست‌محیطی
پژوهش حاضر (۲۰۲۳)		*		*	*	*	*
غاله و همکاران (۲۰۱۹)		*	*		*		
جباری و همکاران (۲۰۲۰)	*	*		*		*	
گل و همکاران (۲۰۱۹)	*		*		*		*

در این پژوهش سعی شده است که نوآوری از سه جنبهٔ خلأ نظری، تکنیکی و کاربردی بررسی دقیق شود که می‌توان از آنها به‌عنوان قوت‌های پژوهش حاضر در مقایسه با بقیهٔ پژوهش‌ها نام برد. از دیدگاه نظری سعی شده تحقیق به‌نسبت جامعی از عوامل مؤثر بر مسیریابی توزیع مواد خطرناک (از قبیل بنزین) برای تعیین مسیر بهینه انجام گیرد. همچنین از منظر تکنیکی پژوهش حاضر با تمرکز بر تلفیق منطق فازی با الگوریتم SPEA2 چندهدفه دارای نوآوری است. در نهایت سعی شد با تدوین مسیرهای بهینه از خلأ کاربردی پژوهش‌های پیشین در این حوزه کاسته شود.

همچنین براساس محدودیت‌های این پژوهش می‌توان برای پژوهش‌های آینده و پژوهش در این حوزه پیشنهاد استفاده از روش‌های غیرقطعی مانند سیستم‌های خاکستری و سیستم‌های کنترل بهینهٔ تصادفی و مقایسهٔ نتایج آنها برای توسعهٔ مدل این پژوهش را پیشنهاد کرد. افزون‌بر این برای نزدیک بودن به شرایط دنیای واقعی می‌توان توابع هدف جدیدی مانند حداکثر کردن رضایت شهروندان از سیستم توزیع سوخت بنزین را که از جنبه‌های زندگی اجتماعی انسان است تعریف کرد.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله مراتب قدردانی و سپاس نویسندگان مقاله از مدیر کل و عوامل اجرایی ادارهٔ کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای استان بوشهر بابت حسن همکاری و ارائهٔ اطلاعات لازم برای اجرای این پژوهش اعلام می‌شود.

منابع

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*, 1-21, doi: 10.1016/j. jhazmat.2016.11.015

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, doi.org/10.1016/j.ins.2017.02.011.

El-Deeb, Z.M., Aboutaleb, W.A., & Ahmed, A. I. (2022). Gasoline and diesel-like fuel production via hydrocracking of hydrotreated tire pyrolytic oil over Ni-W/MCM-41 derived from blast furnace slag, *Journal of the Energy Institute*, 103, 84-93. doi.org/10.1016/j.joei.2022.05.013.

Esfandeh, T., Batta, R., & Kwon, C. (2017). Time-dependent hazardous-materials network design problem. *Transportation Science*,1-21, D doi OI: 10.1287/trsc.2016.0698.

Ghaleh, S., Omidvari, M., Nassiri, P., Momeni, M., & Lavasani, S.M. (2019). Pattern of safety risk assessment in road fleet transportation of hazardous materials (oil materials). Saf Sci.;116:1-2. doi: 10.1016/j.ssci..02.039.

Gul, M., Guneri, A.F., & Nasirli, S.M. (2019). A fuzzy-based model for risk assessment of routes in oil transportation. Int J Environ Sci Technol.16(8):4671-86. doi: 10.1007/s13762-018- 2078-z.

Guo, S., & Zhao, H. (2017). Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. Knowledge-Based Systems, 121, 23-31, doi.org/10.1016/j.knosys.2017.01.010.

He, F., Shen, K., Guan, L., & Jiang, M. (2017). Research on Energy-Saving Scheduling of a Forging Stock Charging Furnace Based on an Improved SPEA2 Algorithm. *Sustainability*, *9*(11), 2154,1-29, doi.org/10.3390/su9112154.

Jabbari, M., Atabi, F., & Ghorbani, R. (2020). Key airborne concentrations of chemicals for emergency response planning in HAZMAT road transportation-margin of safety or survival. *J Loss Prev Proc Ind*. 65:104139. doi: 10.1016/j.jlp. 104139.

Jalili Bal, E., Tavakoli Moghadam, R., Jovanshir, H. (2016). Development of a multi-objective mathematical model for the problem of vehicle routing to transport fuel materials by considering the time window and environmental factors. Scientific-Research Quarterly of Transportation Engineering, Volume 8. 3:353-343 (In Persian).

Kahfi, A., & Tavakoli Moghadam, R. (2016). Solving multi-objective vehicle routing model based on risk reduction using a multi-objective bat algorithm. Transportation engineering scientific-research quarterly, 6(3), 522-507. (In Persian).

Khashaipour, M., Naqdi Zadeh, M.R., & Parsafard, M. (2014). Routing of vehicles carrying hazardous materials in the urban road network (case study, Tehran). Tehran Transport and Traffic Organization, 12th International Conference on Transportation and Traffic Engineering, 1-13 (In Persian).

Khatami Firouzabadi, S.M.A. (2014). *Multi-indicator decision-making: methods and approaches. Sharbiani Publications*, first edition: 243-249, ISBN 9786009475148. (In Persian).

Özceylan, E., Erbaş, M., Çetinkaya, C., & Kabak, M. (2017). A GIS-based risk reduction approach for the hazardous materials routing problem in Gaziantep. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, *23*(6), 1-39, doi.org/10.1080/10807039.2017.1325713.

Purba, D.S.D., Kontou, E. & Vogiatzis, C. (2022). Evacuation route planning for alternative fuel vehicles, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, no. doi.org/10.1016/j.trc.2022.103837.

Safarzadeh, M., Seyed Abrishmi, S.A., & Hasanpour, S. (2017). Risk-based assessment of hazardous materials transport routes - case study of Tehran-Mazandaran routes. Scientific-Research Quarterly of Transportation Engineering, 7(1), 73-86 (In Persian).

Taslimi, M., Batta, R., & Kwon, C. (2017). A comprehensive modeling framework for hazmat network design, hazmat response team location, and equity of risk. Computers and Operations Research,79(C),119-130.

To, C. W., Chow, W. K., & Cheng, F. M. (2020). Numerical studies on explosion hazards of vehicles using clean fuel in short vehicular tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 107, no. doi.org/10.1016/j.tust.2020.103649.

Wash A. M., Kumar, T., & Abdul Ghafir, M. F. (2021). Application of factor analysis in the determination of vapor lock tendency in aviation gasolines/motor gasoline/blends and the compatibility as alternatives in naturally aspirated aviation engines, *Alexandria Engineering Journal*, 60, doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.012.

Yousefi, S., Alizadeh, A., Hayati, J., & Baghery M. (2018). HSE risk prioritization using robust DEA-FMEA approach with undesirable outputs: a study of automotive parts industry in Iran. Saf Sci. 102:144-58. doi: 10.1016/j.ssci. 10.015.

Zero, L., Bersani, C., Paolucci, M., & Sacile, R. (2017). Multi-objective shortest path problem with deterministic and fuzzy cost functions applied to hazmat transportation on a road network.*The 5th International* Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS2017),238-243, doi: 10.1109/MTITS.2017.8005673.