University of Tehran Press

Journal of Environmental Studies
Vol. 50, No. 4, Winter 2025

Print ISSN: 1025-8620
Online ISSN 2345-6922

Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Evaluation of the Risk in Man- Made Hazards of Transporting Dangerous Substances with the Approach of Reducing the Effective Consequences on Environmental Assets

Ali Vejdani Nozar[1], Saeed Givehchi[2], and Bahram Malekmohammadi[3]

1. Department of Disasters Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: ali.vejdani@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Disasters Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: givehchi@ut.ac.ir
3. Department of Disasters Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: malekb@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 23 January 2024
Received in revised form
30 September 2024
Accepted 15 October 2024
Available online
28 February 2025

Keywords:
Consequence,
Dangerous substances,
Hamedan,
Man-made hazards,
Risk.

ABSTRACT

Objective: The development and expansion of road transport causes a great impact on the development of a biological community. Today, rollovers and road accidents are considered as one of the most important man-made hazards in the field of transportation. Accidents that happen during the transportation of dangerous materials always have a great potential to become a disaster and a widespread crisis. This research focuses on assessing the risks caused by the transportation of dangerous substances, identifying the consequences and providing the optimal traffic route in order to reduce the effects on environmental assets in different seasons of the year. The ultimate goal of the research is to provide a comprehensive and generalizable model to be able to be used in achieving the practical purpose.

Method: In this research, the risk of man-made hazards in the transportation of hazardous materials in the study area was calculated considering criteria such as "the number of accidents and rollovers on each road", "the number of traffic intersections according to the number of lanes", "the severity of the accident, the number of deaths per kilometer", and "the travel time on each route" and a mathematical model was desinged. Then, considering the risk of each route and their ranking using the Dijkstra algorithm, the best route for transporting hazardous materials was prioritized in order to reduce the possible consequences.

Results: Most of the studies related to the transportation of hazardous materials are usually conducted based on two general sections, including "determining and assessing transportation risk and identifying and analyzing asset vulnerability" in order to provide a solution to reduce risk. However, in this study, by utilizing the Dijkstra method to reduce possible consequences after calculating the risk of each route, the optimal traffic route was determined as the route with the lowest risk in different seasons of the year. In addition, in this research, in line with the main goal, a comprehensive conceptual model with generalizability has been presented in the form of a flowchart.

Conclusions: In the study process of this research the risk of man-made hazards of carriers of dangerous substances in transportation networks according to various criteria, including the adjusted number of injured on each road, the inherent risk of each route, the number of injured due to heavy vehicle accidents and the population around the route are estimated. Therefore, it is suggested that in future studies, indicators such as the inherent risk of vehicles and the inherent risk of drivers should also be considered.

Cite this article: Vejdani Nozar, A., Givehchi, S. & Malekmohammadi, B. (2025). Evaluation of the Risk in Man- Made Hazards of Transporting Dangerous Substances with the Approach of Reducing the Effective Consequences on Environmental Assets. *Journal of Environmental Studies*, 50 (4), 391- 412.
http//doi.org/10.22059/jes.2024.371565.1008478

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/jes.2024.371565.1008478

Introduction

The development and expansion of road transport has a great impact on the development of a biological community. Today, rollovers and road accidents are considered as one of the most important man-made hazards in the field of transportation. Accidents that happen during the transportation of dangerous materials always have a great potential to become disasters and widespread crises. Therefore, the environmental consequences of hazardous substances force decision makers to consider risk reduction as an important criterion in their calculations. In this regard, optimal traffic routing is one of the ways to reduce risk. So, the risk assessment of the field of transportation of hazardous materials can be useful in introducing the optimal route of transportation in order to reduce the risk and consequences affecting environmental assets.

Method

Most of the researches related to risk assessment and management of transportation of hazardous materials use methods that mainly rely on risk equations and usually aim to provide risk reduction solutions with the approach of reducing the inherent risk of routes and carriers. However, in this research, by examining the transportation routes leading to Hamadan city, the following parameters have been used to calculate the risks of man-made transportation of hazardous materials for each route:

1. The number of accidents and rollovers on each road (Pij)
2. The number of traffic passes according to the number of lines (Sij)
3. The severity of the accident according to the available information (Eij)
4. The inherent risk of each axis for the number of injured and dead per kilometer (Nij)
5. Travel time in each route (tij)
6. The weight of the influence coefficients according to the opinion of experts (W_1=0.35, W_2= 0.43 , W_3= 0.30 , W_4= 0.22).

After estimating the risk of each path through relation ($Rij = W_1tij + W_2(Pij.Eij) + W_3Nij+W_4Sij$) by applying a mathematical model and benefiting from Dijkstra's algorithm in order to reduce the effective consequences on environmental assets, the optimal route for transporting hazardous materials was selected in the network of roads leading to Hamedan city (which has 49 nodes and 71 arcs).

Results

Looking at the existing research and studies, it can be seen that although many studies have been conducted in the field of risk assessment of a system in the face of man-made risks, especially transportation (transportation of dangerous substances), most researchers have tried to use the appropriate method (depending on accuracy and ease of work) for risk assessment and asset vulnerability analysis based on the studied system. In other words, in the field of man-made hazards of transporting dangerous substances, previous studies have been based on two general sections, including determining and assessing transportation risk and identifying and analyzing the vulnerability of assets" in order to provide a solution to reduce risk. But in this research, the focus is on assessing the risks caused by the transportation of dangerous substances, identifying the consequences and providing the optimal traffic route in order to reduce the effects on environmental assets in different seasons of the year. The ultimate goal of the research is to provide a comprehensive and generalizable model to be used for achieving the practical purpose. In this research, in line with the main goal, a

comprehensive conceptual model with the ability to generalize was presented in the form of a flowchart.in this research, in line with the main goal, a comprehensive conceptual model with the ability to generalize is presented in the form of a flowchart.

Conclusions

In this research, the risk of man-made hazards of carriers of dangerous substances in transportation routes according to various criteria, including the adjusted number of injured on each road, the inherent risk of each route, the number of injured people due to heavy vehicle accidents and the population around the route were estimated. In addition, in this research, in order to standardize and adapt the effective criteria in estimating the final risk, the opinions of experts have been used for weighting, and also the time interval in each route has been deliberately considered as an important action. Finally, with the identification of the risk of each route and in order to reduce the effective consequences on environmental assets, using Dijkstra's algorithm, the optimal traffic route of carriers of dangerous substances has been selected in each time period. In other words, the evaluation and analysis of the risk of transportation of dangerous substances in this research was based on indicators such as "the number of accidents and rollovers on each road, the number of traffic crossings based on the number of lanes, the severity of the accident based on emergency data, risk. The nature of each axis has been examined for the number of injured and deceased per kilometer and the duration of travel in each of the routes, which shows the consequential approach in transportation. Therefore, it is suggested that in future studies, indicators such as the inherent risk of vehicles and the inherent risk of drivers should also be considered. In the study area (transportation roads leading to Hamadan city), because the number of traversable routes was large, determining the optimal routes between both points is time-consuming. The results of the survey showed that in order to manage the man-made risks of carriers of dangerous substances (reducing the consequences affecting environmental assets), it is better not to use the following routes in different seasons of the year:

- Hamedan-Bahar-Subashi route (use Hamedan- Bahar- Salehababad- Subashi route instead).
- Hamedan-Kourijan- Tajarak route (Hamedan- Tehran highway route) (use Hamedan-Kourijan- Vian-Famenin- Tajarak route instead).
- Jokar-Avarzaman-Nahavand route (use Jokar- Malayer- Avarzaman- Nahavand route instead).

Since Hamedan to Tehran route is very busy and important, according to the estimation of the weight of the criteria for determining high risk based on the matrix of pairwise comparisons of experts' opinions, the optimal routing of this axis during different seasons of the year using Dijkstra's algorithm has been determined with the aim of reducing the effects on environmental assets in the form of research findings.

Author Contributions

All authors read and approved the content of the manuscript. All authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

This research is in line with doctoral dissertation studies at the University of Tehran, which was conducted by

the student and under the supervision of supervisors. The authors of this article would like to thank all experts in the field of transportation and disasters management in Hamedan who provided valuable information and insights for this study without any expectation of reward.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any financial support.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

University of Tehran Press

نشـــریه محیـــط شناســـی

دوره ۵۰، شمـــاره ۴، زمستان ۱۴۰۳

Homepage: http://Jes.ut.ac.ir

شاپای چاپی: ۸۶۲۰– ۱۰۲۵

شاپای الکترونیکی: ۶۹۲۲– ۲۳۴۵

ارزیابی ریسک مخاطرات انسان‌ساخت ترابری مواد خطرناک با رویکرد کاهش پیامدهای مؤثر بر دارایی‌های محیطی

علی وجدانی نوذر[۱]، سعید گیوه‌چی[۲]✉، بهرام ملک‌محمدی[۳]

۱. گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: ali.vejdani@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: givehchi@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: malekb@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰

کلیدواژه‌ها:
پیامد،
ریسک،
مخاطرات انسان‌ساخت،
مواد خطرناک،
همدان.

چکیده

هدف: توسعه و گسترش حمل‌ونقل جاده‌ای تأثیر زیادی در توسعه یک جامعه‌زیستی دارد. اما امروزه واژگونی و تصادفات جاده‌ای به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات انسان‌ساز در حوزه حمل‌ونقل مطرح می‌باشد. حوادثی که در حین حمل‌ونقل مواد خطرناک رخ می‌دهد، همیشه پتانسیل زیادی برای تبدیل شدن به یک فاجعه و بحرانی فراگیر دارند. در این پژوهش، تمرکز پژوهشگران بر ارزیابی خطرات ناشی از حمل‌ونقل مواد خطرناک، شناسایی پیامدها و ارائه مسیر تردد بهینه به منظور کاهش اثرات بر دارایی‌های زیست‌محیطی در فصول مختلف سال است و هدف نهایی تحقیق یک مدل جامع و قابل تعمیم ارائه شود تا بتوان از آن برای برآورد هدف عملی استفاده کرد.

روش پژوهش: در این مقاله ریسک مخاطرات انسان‌ساخت ترابری مواد خطرناک در منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن معیارهایی همچون «تعداد تصادفات و واژگونی در هر جاده، تعداد معابر ترافیکی با توجه به تعداد خطوط، شدت حادثه، متوفیان در هر کیلومتر و زمان سفر در هر یک از مسیرها» و طراحی مدل ریاضی محاسبه شده و سپس با توجه به ریسک هر مسیر و رتبه‌بندی آنها با بهره‌گیری از الگوریتم دیکسترا، بهترین مسیر حمل مواد خطرناک به‌منظور کاهش پیامدهای محتمل اولویت‌بندی می‌شود.

یافته‌ها: در اکثر مطالعات مرتبط در حوزه ترابری مواد خطرناک، معمولاً تحقیقات بر اساس دو بخش کلی شامل «تعیین و ارزیابی ریسک حمل‌ونقل و شناسایی و تحلیل آسیب‌پذیری دارایی‌ها» به منظور ارائه راه‌حلی برای کاهش ریسک انجام شده است، اما در این تحقیق با بهره‌گیری از روش دیکسترا در راستای کاهش پیامدهای محتمل پس از محاسبه ریسک هر مسیر، مسیر بهینه تردد، مسیر با کمترین ریسک در فصول مختلف سال است. ضمناً در این تحقیق در راستای هدف اصلی، یک مدل مفهومی جامع با قابلیت تعمیم در قالب فلوچارت ارائه شده است.

نتیجه‌گیری: روند مطالعه در این تحقیق نشان می‌دهد که خطر خطرات انسان‌ساز حاملان مواد خطرناک در محورهای مواصلاتی بر اساس معیارهای مختلف از جمله تعداد تعدیل شده مجروحان در هر جاده، خطر ذاتی هر مسیر، تعداد مجروحان ناشی از تصادفات وسایل نقلیه سنگین و جمعیت اطراف مسیر برآورد شده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی شاخص‌هایی مانند ریسک ذاتی وسایل نقلیه و ریسک ذاتی رانندگان نیز در نظر گرفته شوند.

استناد: وجدانی‌نوذر، علی.؛ گیوه‌چی، سعید.؛ و ملک‌محمدی، بهرام. (۱۴۰۳). ارزیابی ریسک مخاطرات انسان‌ساخت ترابری مواد خطرناک با رویکرد کاهش پیامدهای مؤثر بر دارایی‌های محیطی. *نشریه محیط‌شناسی*، ۵۰ (۴)، ۳۹۱– ۴۱۲. http//doi.org/10.22059/jes.2024.371565.1008478

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: http//doi.org/10.22059/jes.2024.371565.1008478

DOR: 20.1001.1.10258620.1403.50.4.1.4

۱. مقدمه

امروزه واژگونی‌ها و مخاطرات جاده‌ای یکی از مهم‌ترین سوانح انسان‌ساخت در حوزه ترابری است. مخاطراتی که در حین ترابری مواد خطرناک رخ می‌دهد، همواره ظرفیت بالایی در تبدیل‌شدن به یک بحران فراگیر دارد. به عبارتی فراوانی تصادفات حمل‌ونقل مرتبط با خطر در طول سال‌ها افزایش یافته است. بر اساس آمار موجود، از ژانویه ۲۰۱۳ تا دسامبر ۲۰۱۷، ۳۵۶ حادثه حمل‌ونقل مواد خطرناک در چین رخ داده است که منجر به کشته شدن ۸۵۵ نفر، مجروح شدن ۲۹۸۰ نفر و تخلیه اضطراری گسترده شده است (Luo et al., 2019). مطابق اطلاعات سازمان ملل متحد تقریباً نصفی از موادی که در راه‌های مواصلاتی اقصی نقاط جهان حمل می‌شوند در گروه مواد خطرناک قرار دارند و در بسیاری موارد محل تولید و مصرف این مواد، چون یکی نیست، باید جابه‌جایی انجام گردد (آذر و همکاران، ۱۳۹۱). مواد خطرناک بر اساس کنوانسیون حمل‌ونقل جاده‌ای کالا و محصولات خطرناک به نه دسته تقسیم‌شده‌اند. این مواد دربرگیرنده مواد منفجره، گازها، مایعات قابل اشتعال، جامدات قابل اشتعال، مواد اکسیدکننده، مواد سمی، مواد رادیواکتیو، مواد خورنده و ضایعات هستند، تقریباً تمامی مواد خطرناک فوق‌الذکر قابل ترابری دارند مشروط به آن که تمامی اصول ایمنی مرتبط رعایت شود. عدم رعایت مؤلفه‌ها و اصول ایمنی در طی ترابری مواد و محصولات خطرناک می‌تواند باعث رخداد سوانح و بحران‌های جبران‌ناپذیر گردد. معمولاً عوامل و مؤلفه‌های گوناگونی در انتخاب چگونگی حمل و مسیر ترابری مواد خطرناک، مثل مؤلفه‌های اجتماعی و محیطی، زیرساخت‌های ترابری، واکنش به هنگام، وضعیت اقلیمی و جوی و پایش کیفی مؤثر است (زایرزاده و همکاران، ۱۳۸۷).

در واقع مواد خطرناک به موادی اطلاق می‌شود که امکان ایجاد خطر داشته و سلامت موجودات زنده اعم از انسان‌ها، حیوانات و نباتات و همچنین سایر دارایی‌های محیط‌زیست را تهدید کند. در واقع دارایی‌های آسیب‌پذیر در ترابری مواد خطرناک دربرگیرنده دارایی‌های اجتماعی، دارایی‌های محیط‌زیستی (همانند مراتع، جنگل‌ها، کشتزارها، منابع خاکی و آبی مثل دریاچه‌ها و رودخانه‌ها، دریاها)، خودروها، حامل‌های ترابری، مواد خطرناک باارزش و سایر دارایی‌های زیرساختی نظیر جاده‌ها، پل‌ها و تونل‌ها و ابنیه است (خشایی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

مطالعات و پژوهش‌های موجود بیانگر این است که از هر ۲۰ حادثه ترابری محموله‌های خطرناک یکی منجر به آتش‌سوزی و از هر پنج حادثه منجر به آتش‌سوزی، یکی به انفجار ختم می‌شود و در موارد مرتبط با حمل گازها نیز یکی منجر به انتشار گاز در محیط شده است. لذا مضاف بر جنبه‌های اقتصادی و مالی ترابری مواد خطرناک، همواره معیارهای انسانی و محیط‌زیستی آن نیز باید مدنظر قرار گیرد. هر چند احتمال وقوع این حوادث بسیار کم است، لیکن در صورت وقوع، پیامدهای جبران‌ناپذیر و تأثیرگذاری بر دارایی‌ها خواهد داشت (Zografos & Androutsopoulos, 2004).

هر چند بسته به نوع مواد خطرناک پیامدهای ناشی از انتشار آن در محیط متفاوت خواهد بود، ولی به‌طور عمومی مهم‌ترین پیامدهای ناشی از این نوع مخاطرهٔ انسان‌ساخت به شرح ذیل است:

- مرگ‌ومیر و مسمومیت‌ها و مصدومیت‌های جبران‌ناپذیر
- انتشار مواد خطرناک در هوا، خاک و آب
- انفجار و آتش‌سوزی و خسارات مالی و جانی و همچنین از بین رفتن دارایی‌ها
- صدمه، پیامد یا تأثیرات بلندمدت بر جمعیت
- پیامدهای مؤثر بر سلامتی حیوانات و نباتات
- اختلال تردد در مسیر آسیب‌دیده

سایر آثار بهداشتی و محیط‌زیستی (توکلی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۲؛ Erkut & Gzara. 2008).

عواقب و پیامدهای مؤثر مواد خطرناک، مدیران و متولیان مرتبط را مجبور می‌کند تا مدیریت و تقلیل خطرپذیری را به‌عنوان شاخصی بااهمیت در برآوردهای خود مدنظر داشته باشند. لذا مسیرهای مجاز جهت ترابری مواد خطرناک با رویکرد کاهش پیامدهای مؤثر بر دارایی‌های محیطی باید با توجه به شاخص‌های تأثیرگذار مانند «ایمنی راه، وضعیت محیط‌زیستی، جمعیت پیرامونی مسیرهای مورد استفاده» تعیین شود و همواره مشخص کردن کوتاه‌ترین مسیر راهکار بهینه نخواهد بود. از آنجایی که در مسیریابی ترابری مواد خطرناک،

شاخص‌هایی مثل زمان ترابری، مسافت‌گذری، جمعیت اطراف، تعداد تصادفات در مسیر مؤثر است، اما اکثر مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه بر دو بخش کلی شامل «تعیین ریسک ترابری برای عبور از یک مسیر خاص و تعیین مسیری که کمترین ریسک و هزینه برای تردد محموله‌های خطرناک را داشته باشد» استوار است (Erkut & Gzara. 2008; Carotenuto, et al., 2007).

در کشور جمهوری اسلامی ایران مطابق «آیین‌نامه اجرایی حمل‌ونقل جاده‌ای مواد خطرناک»، موادی که نسبت به سلامت و بهداشت انسان‌ها، حیوانات، نباتات و دارایی‌های محیط‌زیست به‌طور ذاتی خطرآفرین بوده و مشمول یکی از دسته‌بندی‌های نه‌گانه زیر باشند به‌عنوان مواد خطرناک تعریف می‌شود:

۱. دسته‌بندی یک: این دسته به سه گروه زیر تقسیم می‌شود:
   ۱-۱. مواد و محصولات منفجره
   ۱-۲. محصولات و کالاهایی که با مواد منفجره انباشته گردیده‌اند.
   ۱-۳. محصولات و کالاهایی که ایجاد آتش‌سوزی و احتراق می‌نمایند.
۲. دسته دو: این دسته مشتمل است بر گازهای تحت‌فشار مایع نشده و گازهای نامحلول تحت‌فشار.
۳. دسته سه: این دسته مشتمل است بر مایعات قابل اشتعال.
۴. دسته چهار: این دسته به سه گروه تقسیم می‌شود:
   ۴-۱. جامدات قابل اشتعال.
   ۴-۲. موادی که دارای قابلیت آتش‌سوزی و آتش‌افروزی خودبه‌خود می‌باشند.
   ۴-۳. موادی که براثر تماس با آب یا مجاور با رطوبت، گازهای قابل اشتعال تولید می‌کنند.
۵. دسته پنج: این دسته به دو گروه تقسیم می‌شود:
   ۵-۱. موادی که باعث ایجاد زنگ‌زدگی می‌شوند.
   ۵-۲. پراکسیدهای آلی
۶. محصولات سمی، مواد و محصولات متعفن که باعث ایجاد و نشر بیماری‌های عفونی می‌گردند.
۷. دسته هفت: مواد رادیواکتیو
۸. دسته هشت: مواد خورنده و اسیدها
۹. دسته نه: مواد و محصولات خطرناک متفرقه (وزارت راه و شهرسازی جمهوری اسلامی ایران و سازمان حفاظت محیط‌زیست).

بنابراین توجه به مدیریت و کاهش ریسک تصادفات و واژگونی حامل‌های مواد خطرناک به‌عنوان یکی از مخاطرات انسان‌ساخت رایج در محورهای مواصلاتی ایران با رویکرد تقلیل پیامدهای محتمل باید همواره مورد توجه باشد.

۲. پیشینه پژوهش

با مروری بر منابع علمی و مقالات داخلی و بین‌المللی که برخی از آن‌ها در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، می‌توان دریافت هر چند تحقیقات زیادی در خصوص ارزیابی ریسک یک سیستم در مواجهه با مخاطرات انسان‌ساخت به‌ویژه مخاطرات حمل‌ونقل مواد خطرناک وجود دارد، لیکن اکثر محققین با توجه به سیستم مورد مطالعه سعی کرده‌اند از روش متناسب (بسته به دقت و راحتی کار) جهت ارزیابی ریسک و پیامدهای مؤثر بر دارایی‌های مرتبط استفاده نمایند. اما همان‌طور که گفته شد، عمده تحقیقات در زمینه ارزیابی ریسک مخاطرات انسان‌ساخت ترابری مواد خطرناک بر دو بخش کلی شامل «تعیین ریسک ترابری برای عبور از یک مسیر خاص و تعیین مسیری که کمترین ریسک و هزینه را برای تردد مواد خطرناک داشته باشد» متمرکز شده است (توکلی مقدم و همکاران، ۱۳۹۲؛ Carotenuto et al., 2007).

غله[1] و دیگران (۲۰۱۹) در طی پژوهشی با هدف ارائه الگوی ارزیابی ریسک ایمنی ناوگان جاده‌ای حمل‌ونقل مواد خطرناک و طبقه‌بندی کامیون‌ها با رویکرد ایمنی، در ابتدا با مشخص نمودن عوامل اصلی و فرعی ریسک ایمنی با استفاده از روش تحلیل ریسک شغلی و نظر خبرگان و وزن‌دهی بر اساس تحلیل سلسله‌مراتب فازی[2] در نهایت با در نظر گرفتن حالت‌های شکست و رویکرد تحلیل اثر[3] الگوی خود را ارائه نمودند (Ghaleh et al., 2019).

گو و لو[4] (۲۰۲۲) در طی پژوهشی ضمن بررسی تعدادی از مطالعات و تحقیقات مرتبط به ارزیابی ریسک ترابری مواد خطرناک در طی سال‌های ۱۹۹۱ لغایت ۲۰۲۰ به اهمیت و بروز رسانی این مطالعات در راستای کاهش پیامدهای ناشی از حمل‌ونقل مواد خطرناک در سراسر دنیا تأکید نمودند (Guo & Luo, 2022).

آذر و دیگران (۱۳۹۱) الگوی ترابری چند دسته از مواد خطرناک در راه‌های مواصلاتی با مبدأ و مقصد متفاوت و با تقاضای معین را در مورد شبکه راه‌های استان فارس بررسی کرده‌اند. در این پژوهش برای مسیریابی بهینه هم به ریسک کل شبکه و هم به ریسک مسیر توجه شده است تا تناسب در توزیع خطرپذیری برقرار باشد. به عبارتی جهت برآورد خطرپذیری ترابری مواد خطرناک با این فرض که هر تصادف و واژگونی در مسیر منجر به سانحه می‌شود، احتمال و نرخ تصادفات مسیر به‌عنوان احتمال سانحه در نظر گرفته شد. برای برآورد شدت یا پیامدهای مؤثر سانحه نیز از میان مؤلفه‌های شناخته شده در تحقیقات پیشین مطابق نظر کارشناسان اداره کل راهداری و حمل جاده‌ای به‌عنوان تصمیم‌گیرنده، سه مؤلفه جمعیت پیرامونی، محیط‌زیست در معرض خطر و تعداد و اهمیت ابنیه مسیر، انتخاب و همه داده‌ها و اطلاعات مربوط به‌احتمال و شدت سانحه از طریق پرسشنامه گردآوری شده است. برای تعیین وزن و میزان تأثیر نوع ماده بر شدت سانحه (پیامدهای مؤثر) از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی گروهی استفاده شد. سرانجام ریسک در هر مسیر با به‌کارگیری رابطه ۱ محاسبه شد:

$$R= P(w_1c_1+w_2c_2+w_3c_3)$$ رابطه ۱)

در این رابطه، p احتمال تصادف در مسیر، C1, C2, C3 ترتیب متناظر با شدت خسارت و پیامد جمعیتی، محیطزیست و ابنیه و W1, W2, W3 به ترتیب وزن‌های متناظر با هر کدام از مؤلفه‌های شدت سانحه است. میزان ریسک برای همه مسیرها و به ازای همهٔ انواع مواد خطرناک عبوری محاسبه می‌شود. از آنجایی که مسیر ایمن به تنهایی ممکن است برای هیچ مجموعه فعال در حوزه حمل‌ونقل توجیه اقتصادی نداشته باشد، لذا مدلی طراحی شد تا با تلفیق نتایج به‌دست آمده از حل مدل، توجه به ایمنی در کنار شاخص طول مسیر، با هم بحث اقتصادی و ایمن بودن را در نظر بگیرد. هدف مدل جدید کمینه‌سازی کل طول طی شده به ازای همهٔ مواد و در کل شبکه راه‌ها است و محدودیت اصلی آن ریسک است تا ریسک ترابری مواد خطرناک هر مسیر از حد معینی فراتر نرود. شبکه مطالعه موردی این پژوهش شبکه راه‌های استان فارس بوده است (آذر و همکاران، ۱۳۹۱).

توکلی مقدم و دیگران (۱۳۹۱) الگوی جدیدی به‌منظور مسیریابی در حوزه حمل‌ونقل جهت کمینه کردن خطرپذیری ترابری مواد خطرناک ارائه نموده‌اند در این الگو مضاف بر کمینه کردن هزینه‌های ترابری، کاهش خطرپذیری مسیر نیز مدنظر قرار گرفته و برنامه زمانی متناسبی برای ارائه خدمت به مشتریان داده شده تا هزینه‌های منابع انسانی کم و برنامه‌ریزی مناسبی جهت مسیریابی و حمل مواد خطرناک تعریف شود. در این پژوهش یک مدل و الگوی مسیریابی ترابری چند هدفِ شامل کمینه‌سازی هزینه ترابری و خطرپذیری وقوع سوانح در ترابری مواد خطرناک ارائه شده است. همچنین اهمیت زمان دریافت مواد به دلیل توانایی در برنامه‌ریزی نیروی انسانی و تخلیه مواد خطرناک از جمله اهداف دیگر این پژوهش بود. افزون بر این سایر قیود ظرفیت و زمان توزیع منظور گردیده است (توکلی مقدم و همکاران، ۱۳۹۱).

شین[5] و دیگران (۲۰۱۳)، پژوهشی را تحت عنوان بهینه‌سازی استوار مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل مواد خطرناک را ارائه کرده که در

1. Ghaleh
2. FAHP
3. FMEA
4. Guo and Luo
5. Xin

هر یک از مسیرها ریسک را به‌صورت یک بازه مشخص کرده است و از مدل ارائه شده در استان گوانگ‌دانگ چین نیز استفاده کرده است (Xin et al., 2013). لی[1] و دیگران (۲۰۲۰) یک روش تحلیل ریسک بلادرنگ بر اساس شبکه بیزی فازی با در نظر گرفتن حمل‌ونقل در یک تانکر نفت پیشنهاد کرد که به‌صورت پویا تغییرات احتمال تصادف و سطح پیامد حمل‌ونقل نفت‌کش در جاده‌ها را منعکس می‌کند (Li et al., 2020). در راستای کاهش ریسک و ارائه راهکار به‌منظور مدیریت پیامدهای ناشی از مخاطرات حمل‌ونقل مواد خطرناک، گوفورث[2] و دیگران (۲۰۲۰) از فناوری GIS برای پیشنهاد یک برنامه چندهدفه استفاده نمودند که ضمن تجزیه‌وتحلیل ریسک مسیرهای مواصلاتی، مسیرهای کم‌خطر را برای حمل‌ونقل زباله‌های خطرناک تسهیل می‌کند (Goforth et al., 2020). سات[3] و دیگران (۲۰۱۴) در راستای ارائه مدل کاهش پیامدهای ناشی از حمل‌ونقل مواد خطرناک ضمن تجزیه‌وتحلیل حمل‌ونقل ریلی کالاهای خطرناک در آمریکای شمالی، مدل پیامدهای محیط‌زیستی حمل‌ونقل مواد خطرناک را ارائه نمود که می‌تواند برای محاسبه ریسک محیط‌زیستی نیز استفاده شود (Saat et al., 2014).

هر چند طبق جدیدترین پژوهش‌ها سرانجام گوفورث و دیگران (۲۰۲۰) و لوزاهرناند و ژندرو[4] (۲۰۲۰) از تئوری شبکه پیچیده استفاده کردند و به ترتیب ریسک را در گره‌های شبکه حمل‌ونقل در نظر گرفتند تا چارچوب ارزیابی ریسک حمل‌ونقل ریلی–کامیونی را توسعه دهند (Loza Hernande & Gendreau, 2020; Goforth et al., 2020). لیکن ارزیابی ریسک حامل‌های مواد خطرناک همواره یکی از موضوعات خاص به‌منظور ارائه راهکارهای کاهش خطرپذیری آن در مناطق مختلف جهان است. با نگاهی به مبانی نظری مرتبط، ریسک پتانسیل یک خروجی ناخواسته یا عواقب ناگوار است که می‌تواند به دنبال انواع مخاطرات (حادثه، سانحه یا فاجعه) ایجاد شود.

به عبارتی ریسک خسارت محتملی است که با داشتن تابع توزیع احتمال می‌توان میانگین آن را محاسبه کرد. به‌طورکلی در مباحث مرتبط با مدیریت سوانح، ریسک را توسط درست‌نمایی (احتمال) وقوع یک خطر، آسیب‌پذیری و پیامد ناشی از آن تعریف می‌کنند (امیدوار و وجدانی نوذر، ۱۴۰۰؛ Lewis, 2020). با توجه به سیستم یا شبکه مدنظر جهت ارزیابی ریسک، معادلات مختلفی توسط صاحب‌نظران آن سیستم یا آن شبکه تعریف شده است، لیکن شناخته شده‌ترین معادلات به کار رفته در مدیریت سوانح به شرح روابط ۲ و ۳ است (امیدوار و وجدانی نوذر، ۱۴۰۰; Fagel, 2011; Lewis, 2020).

$$Risk= T.V.C \quad \text{رابطه ۲)}$$

$$Risk= P.E \quad \text{رابطه ۳)}$$

T= تهدید (بر مبنای احتمال بوده و عددی بین ۰ و ۱ است یا بر مبنای درصد تعریف می‌شود)

V= آسیب‌پذیری (بر مبنای احتمال بوده و عددی بین ۰ و ۱ است یا بر مبنای درصد تعریف می‌شود)

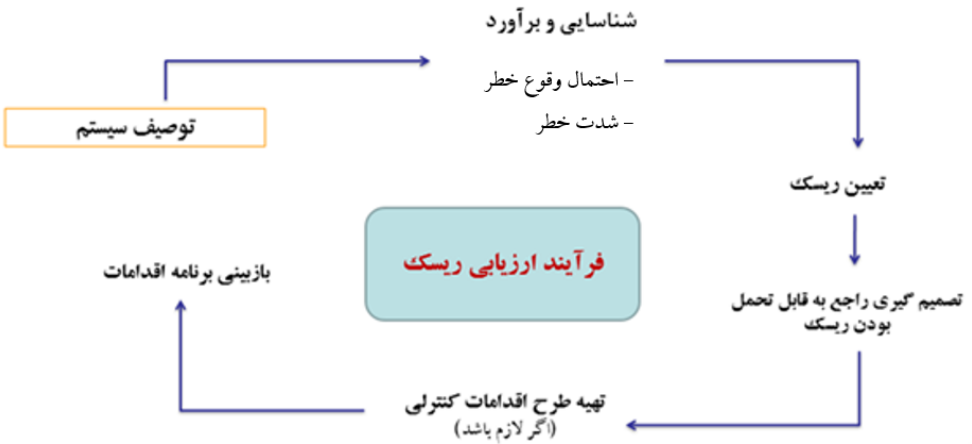
C = عواقب یا پیامد (با توجه به این که عواقب چه موضوعی مدنظر باشد واحد آن متفاوت خواهد بود)

P= احتمال وقوع یک خطر (بر مبنای احتمال بوده و عددی بین ۰ و ۱ است یا بر مبنای درصد تعریف می‌شود)

E = شدت خطر (از تحلیل برآیند آسیب‌پذیری و پیامدهای محتمل یک خطر بر مبنای احتمال تعیین می‌شود و عددی بین ۰ و ۱ است یا بر مبنای درصد تعریف می‌گردد)

ارزیابی ریسک در یک سیستم معمولاً با سه رویکرد انجام می‌گیرد، یا دارایی محور است یا سناریو محور و در برخی موارد هم به‌صورت ترکیبی انجام می‌شود (امیدوار و وجدانی نوذر، ۱۴۰۰; Fagel, 2011). فارغ از هر رویکرد، آنچه همواره در ارزیابی ریسک باید مورد توجه باشد، فرایند ارزیابی است (شکل ۱) که در طی آن باید مؤلفه‌های ریسک شامل احتمال وقوع خطر و شدت آن مورد بررسی و سنجش قرار گیرد. به دنبال تعیین ریسک در هر سیستمی مانند سیستم حمل‌ونقل و شبکه‌های جاده‌ای، باید ریسک تعیین‌شده به‌منظور قابل تحمل بودن یا نبودن آن با معیاری مورد سنجش قرار گیرد.

1. Li
2. Goforth
3. Saat
4. Loza Hernande and Gendreau



شکل ۱. فرایند ارزیابی ریسک (امیدوار و وجدانی نوذر، ۱۴۰۰)

پس از ارزیابی ریسک محورهای مختلف مواصلاتی در یک منطقه، یکی از اقدامات کنترلی به‌منظور کاهش ریسک به‌ویژه کاهش پیامدهای مؤثر بر دارایی‌های محیطی، انتخاب مسیر بهینه به‌منظور تردد است به عبارتی با توجه به ریسک هر مسیر باید فرآیند مسیریابی بهینه در هر محور مورد توجه قرار گیرید، در این خصوص مراحل مسیریابی عبارت است از شناخت وضعیت و شناسایی معیارهای مؤثر و ارزشیابی آن‌ها که باعث رتبه‌بندی مسیرها نسبت به هم شود. وزارت حمل‌ونقل ایالات متحده[1] (۱۹۹۶) شاخص‌های تأثیرگذار در انتخاب مسیر بهینه حمل‌ونقل مواد خطرناک را در ۱۳ مورد به شرح جدول ۱ ذکر کرده است (خشایی و همکاران، ۱۳۹۱ ;DOT, 1996)

جدول ۱. شاخص‌های مؤثر بر انتخاب مسیر وسایل نقلیه حامل مواد خطرناک (خشایی و همکاران، ۱۳۹۱؛ DOT, 1996)

ردیف	شاخص	ملاحظات
۱	ریسک جمعیتی (جمعیت آسیب‌پذیر)	جمعیتی که به‌صورت بالقوه در معرض خطرات ناشی از حمل‌ونقل مواد خطرناک قرار دارند.
۲	نوع راه	فاکتورهای راه همچون حرکت کافی، عرض خط مناسب، شیب طولی و شیب عرضی مناسب، سرعت طرح، فاصله دید و ...
۳	نوع و مقدار مواد خطرناک	میزان خطرآفرینی مواد خطرناک رابطه مستقیم با نوع و مقدار آن دارد.
۴	قابلیت امدادرسانی	قابلیت امدادرسانی و مهارت در آن نقش مهمی در کنترل خطرات دارد.
۵	آسیب‌پذیری مراکز حساس	بهتر است خودروهای حامل مواد خطرناک تا شعاع خاصی از مراکز حساس شهری، نظیر مراکز سیاسی تردد نداشته باشند.
۶	شرایط توپوگرافی	گسترش ابعاد حادثه و همچنین زمان موردنیاز برای عملیات امدادرسانی و پاک‌سازی به شرایط توپوگرافی مسیر وابسته است.
۷	تداوم مسیر	تداوم مسیر بیانگر این است که انحراف از مسیر باید حداقل باشد.
۸	مسیرهای جایگزین	مسیرهای جایگزین در صورت مسدود شدن مسیر فعلی، اهمیت ویژه‌ای دارد.
۹	ملاحظات اقتصادی	حمل‌ونقل مواد خطرناک باید به لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد.
۱۰	تأخیر در حمل‌ونقل	تأخیر در حمل‌ونقل نظیر تأخیر در تقاطع‌ها، پتانسیل وقوع خطر ثانویه را افزایش می‌دهد.
۱۱	شرایط اقلیمی	شرایط آب و هوایی نظیر بارش برف، کولاک و یخبندان در وقوع حادثه مؤثر است.
۱۲	پیشینه تصادفات	بهتر است معابری که احتمال وقوع تصادف در آن بالاست برای حمل‌ونقل مواد خطرناک مورداستفاده قرار نگیرد.
۱۳	حجم ترافیک معابر	با افزایش حجم ترافیک معابر، جمعیت آسیب‌پذیر و احتمال وقوع حادثه افزایش می‌یابد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

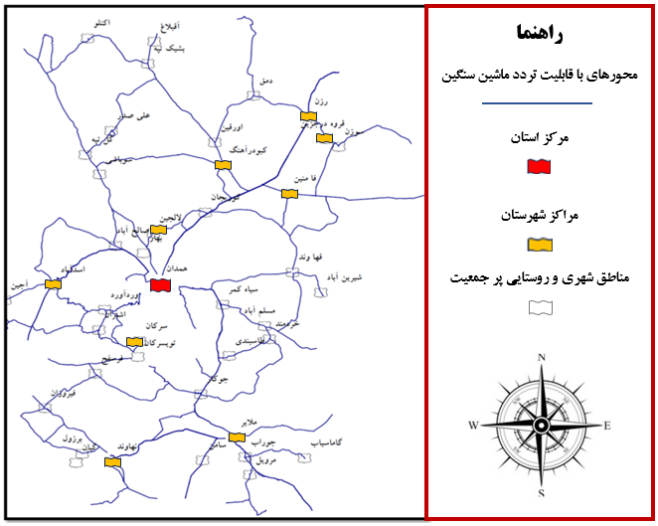
مدیریت و تقلیل ریسک ترابری مواد خطرناک از روش‌های مختلفی در پژوهش‌های پیشین بررسی شده است. در این راستا برخی فعالیت‌های مقدماتی مانند آموزش رانندگان حرفه‌ای، پایش منظم وسایط نقلیه و اقدامات پیشرفته‌تر مثل کاربرد تکنیک‌های پژوهش در ارائه الگوهای

1. U.S. Department of Transportation (DOT)

مسیریابی مورد بررسی قرار گرفته است. آبکوویتز و چنگ[1] (۱۹۸۸) مسیریابی ترابری مواد خطرناک را انتخاب بهترین مسیر بین مبدأ و مقصد می‌داند (Abkowitz & Cheng, 1988). از نظر مجموعه‌های حوزه ترابری، قراردادهای حمل و جابه‌جایی مواد خطرناک مستقل بسته می‌شود و اتخاذ تصمیمات در خصوص مسیریابی نیز باید جداگانه گرفته شود که به آن برنامه‌ریزی مسیریابی محلی گویند (آذر و همکاران، ۱۳۹۱).

محمدفام[2] و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی با هدف ارزیابی ایمنی حمل‌ونقل گاز کلر و تحلیل پیامدهای انتشار آن با مطالعه مقطعی-تحلیلی شهر تهران در سال ۱۳۹۹ و کاربرد شاخص رتبه‌بندی ریسک حمل‌ونقل در ابتدا ریسک کمی حمل‌ونقل مواد خطرناک را اندازه‌گیری و ارزیابی نموده و سپس برای تعیین پیامد سناریوهای تصادف احتمالی در مسیر حمل‌ونقل از نرم‌افزار PHAST استفاده نمودند (Mohammadfam et al., 2023). اما در پژوهش حاضر پس از برآورد ریسک هر مسیر با کاربرد یک مدل ریاضی و بهره‌مندی از الگوریتم در راستای کاهش پیامدهای مؤثر بر دارایی‌های محیطی، مسیر بهینه برای حمل مواد خطرناک در شبکه راه‌های استان همدان (دارای ۴۹ گره و ۷۱ کمان) انتخاب می‌شود. در شکل ۲ نقشه راه‌های قابل استفاده برای حمل‌ونقل وسایل نقلیه استان همدان مشخص شده است.

به عبارتی در این پژوهش با مطالعه راه‌های مواصلاتی استان همدان، برای محاسبه ریسک مخاطرات انسان‌ساخت حامل‌های مواد خطرناک در هر مسیر از پارامترهای «تعداد تصادفات و واژگونی در هر جاده، تعداد عبور مرورها با توجه به تعداد خطوط، شدت حادثه بر اساس داده‌های اورژانس و ریسک ذاتی هر محور به ازای تعداد مجروحان و متوفیان در هر کیلومتر» استفاده می‌شود. ضمناً ریسک حمل‌ونقل مواد خطرناک می‌تواند بر اساس زمان نیز ارزیابی شود، ارزیابی ریسک مبتنی بر زمان حمل‌ونقل اغلب با سیاست عوارض و مدیریت اضطراری همراه است. ازدحام و زمان سفر را می‌توان با یک سیاست معقول عوارض کاهش داد. علاوه بر این، استقرار سریع واکنش اضطراری می‌تواند از تلفات یا آسیب بیشتر به محیط اطراف ناشی از حوادث جلوگیری کند تا عواقب آن را به حداقل برساند (Wang et al., 2012; Zhao & Ke, 2019). لذا در این تحقیق زمان سفر در هر یک از مسیرها به‌عنوان یکی دیگر از پارامترها در وزن‌دهی و رده‌بندی مسیرها برحسب عدد ریسک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در خاتمه در راستای هدف پژوهش، در این تحقیق با بهره‌گیری از الگوریتم دیکسترا و نیز کاربرد دانش مدل‌سازی و طراحی یک مدل ریاضی، بهترین مسیر حمل مواد خطرناک به‌منظور کاهش پیامدهای محتمل، مسیری خواهد بود که دارای کمترین عدد ریسک باشد.



شکل ۲. نقشه محورهای قابل‌استفاده وسایل نقلیه استان همدان (ولائی و جدانی نوذر، ۱۳۹۷)

1. Abkowitz & Cheng
2. Mohammadfam

۱-۳. ارزیابی ریسک

ارزیابی ریسک در یک سیستم معمولاً با سه رویکرد انجام می‌گیرد، یا دارایی محور است یا سناریو محور و در برخی موارد هم به‌صورت ترکیبی انجام می‌شود (امیدوار و وجدانی نوذر، ۱۴۰۰ ;Fagel, 2011). فارغ از هر رویکرد، آنچه همواره در ارزیابی ریسک باید مورد توجه باشد، برآورد مؤلفه‌های ریسک یعنی احتمال وقوع خطر و شدت آن است. به عبارتی در این مقاله با مطالعه راه‌های مواصلاتی استان همدان، برای محاسبه ریسک مخاطرات انسان‌ساخت حامل‌های مواد خطرناک در هر مسیر از پارامترهای «تعداد تصادفات و واژگونی در هر جاده، تعداد عبور مرورها با توجه به تعداد خطوط، شدت حادثه بر اساس داده‌های اورژانس و ریسک ذاتی هر محور به ازای تعداد مجروحان و متوفیان در هر کیلومتر» استفاده می‌شود. ضمناً زمان سفر در هر یک از مسیرها نیز به‌عنوان یکی دیگر از پارامترها در وزن‌دهی و رده‌بندی مسیرها برحسب عدد ریسک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به دنبال تعیین ریسک در هر سیستمی همچون سیستم حمل‌ونقل و شبکه‌های جاده‌ای، باید ریسک تعیین شده به‌منظور قابل تحمل بودن یا نبودن آن با معیاری مورد سنجش قرار داد در این تحقیق معیار موردنظر، سطوح ریسک تعریف شده (جدول ۲) توسط برنامه ارزیابی ریسک کشور نیوزلند در سیستم حمل‌ونقل جاده‌ای آن است (KiwiR, 2008).

جدول ۲. سطوح ریسک (KiwiR, 2008)

رتبه‌بندی ریسک	ریسک جمعی میانگین تصادفات مرگبار و جراحات جدی سالانه در هر کیلومتر	ریسک شخصی میانگین تصادفات مرگبار و جراحات جدی سالانه در هر ۱۰۰ میلیون وسیله نقلیه- کیلومتر	رنگ
کم	≤۰/۰۳۹	<۴	
کم تا متوسط	۰/۰۴≤۰/۰۶۹	۴≤۴/۹	
متوسط	۰/۰۷≤۰/۱۰	۵≤۶/۹	
متوسط تا زیاد	۰/۱۱≤۰/۱۸۹	۷≤۸/۹	
زیاد	۰/۱۹+	۹+	

۲-۳. الگوریتم پیمایشی دیکسترا[1]

ادزگر وایبی دیکسترا[2] (۱۹۵۹)، دانشمند هلندی علوم کامپیوتر، الگوریتم دیکسترا را که یک الگوریتم پیمایش گرافی است در سال ۱۹۵۹ میلادی ارائه نموده است (Dijkstra,1959).

در واقع الگوریتم دیکسترا مسأله «کوتاه‌ترین مسیر از مبدأ واحد را برای گراف‌های وزن‌داری که یال‌هایی با وزن منفی ندارند» حل می‌کند و در نهایت با ارائه درخت کوتاه‌ترین مسیر، کوتاه‌ترین مسیر از مبدأ به هر رأسی از گراف را مشخص می‌کند.

ضمناً می‌توان از این الگوریتم پیمایش گرافی برای مشخص کردن کوتاه‌ترین مسیر از مبدأ تا مقصد طوری بهره برد که در حین اجرا به محض پیدا شدن کوتاه‌ترین مسیر از مبدأ به مقصد، الگوریتم را متوقف کرد. به عبارتی الگوریتم پیمایش گرافی دیکسترا یکی از روش‌های مورد استفاده برای برآورد کوتاه‌ترین مسیر تک منبع محسوب می‌شود.

با این حال فرایند اجرایی الگوریتم دیکسترا به شرح زیر است:

۱. مشخص نمودن رأس مبدأ

۲. تشکیل مجموعه‌ای به نام S که شامل رئوس گراف باشد: در ابتدا این مجموعه خالی بوده و با توسعه الگوریتم، رئوسی که کوتاه‌ترین مسیر به آن‌ها یافت شده است را در برمی‌گیرد.

۳. قرار دادن رأس مبدأ با اندیس صفر در داخل مجموعه S.

٤. در نظر گرفتن اندیسی معادل (طول یال + اندیس رأس قبلی) برای رئوس خارج از مجموعه S: اگر رأس خارج از مجموعه دارای

1. Dijkstra's algorithm
2. Edsger Wybe Dijkstra

اندیس باشد، اندیس جدید مقدار کمینه از بین اندیس قبلی و طول یال + اندیس رأس قبل است.

۵. اضافه کردن رأسی با کمترین اندیس انتخاب شده از رئوس خارج مجموعه به مجموعه S : تکرار این کار از مرحله ۴ تا رأس مقصد وارد مجموعهٔ S شود.

در پایان اگر رأس مقصد دارای اندیس بود، این اندیس بیانگر مسافت بین مبدأ و مقصد است و اگر رأس مقصد دارای اندیس نبود این بدان معنی است که هیچ مسیری بین مبدأ و مقصد وجود ندارد. با این حال برای پیدا کردن مسیر می‌توان با در نظر گرفتن اندیس دیگری برای هر رأس که بیانگر رأس قبلی در مسیر طی شده باشد. اقدام کرد. بدین‌ترتیب پس از اتمام اجرای الگوریتم پیمایش دیکسترا، با دنبال کردن رئوس قبلی از مقصد به مبدأ، کوتاه‌ترین مسیر بین دو نقطه نیز مشخص خواهد شد (هاشم‌پور و همکاران، ۱۳۹۳؛ ولایی و وجدانی‌نوذر، ۱۳۹۷).

۳-۳. ملاحظات مدل‌سازی

در طراحی مدل ریاضی این پژوهش فرضیات به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

۱. رابطه‌های بین متغیرها، خطی است.
۲. هر گره می‌تواند نقطهٔ تقاضا یا نقطه عرضه باشد.
۳. از همهٔ مسیرها در دو جهت رفت‌وبرگشت استفاده می‌شود.
۴. فرض بر این است که ریسک ترابری مواد خطرناک بین دو گره در جهت رفت با جهت برگشت یکسان است.
۵. فرض بر این است هر تردد شامل یک حامل یا تانکر با مقدار مشخصی از مواد خطرناک است و در قبال هر تردد (با توجه به ماده قابل‌حمل)، ریسک معینی در مسیر وجود دارد.

۴-۳. ساخت مدل ریاضی و ارائه راه‌حل و تحلیل

در ابتدا تمامی متغیرهای لازم جهت فرمول‌های این بخش به شرح ذیل تعریف می‌گردد:

Xij متغیر تصمیم است اگر ارتباطی بین گره i و j برقرار باشد Xij برابر یک و در غیر این صورت Xij صفر در نظر گرفته می‌شود.

tij زمان سفر در طول مسیر از گره i به گره j است.

rij معادل ریسک در طول مسیر از گره i به گره j است.

Min Z_1 معادل کوتاه‌ترین مسیر است (رابطه ۴).

Min Z_2 معادل مسیر بهینه با حداقل خطر در هر سفر است (رابطه ۵).

نقطه اولیه برابر O و مقصد نهایی با d نشان داده شده است.

اهداف و محدودیت‌های مدل نیز به‌صورت زیر خلاصه می‌گردند:

الف) به حداقل رساندن زمان سفر

یکی از اهداف مهم مسیریابی پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر است که در هدف اول این امر قید شده است که زمان هر سفر (tij) از تقسیم مسافت بر متوسط سرعت که از دستگاه‌های تردد شمار استخراج شده است به دست می‌آید.

$$\text{Min } Z_1 = \sum_i \sum_j t_{ij} X_{ij}$$ رابطه ۴)

ب) به حداقل رساندن خطرات در هر سفر

محاسبه و برآورد خطر در هر سفر یکی از مراحل دشوار مدل‌سازی است که باید بر اساس احتمال اتفاق تصادفات یا سایر حوادث و همچنین بر اساس میزان مسافت و زمان سفر محاسبه گردد، یعنی هر چقدر مسافت جابه‌جایی طولانی‌تر باشد و زمان جابه‌جایی مواد بیشتر گردد، میزان خطر نیز بالاتر خواهد رفت. یکی از راه‌های تعیین میزان ریسک ترافیک مسیر است. در واقع میزان ریسک جابه‌جایی بر اساس

حجم ترافیکی جاده در ساعت تعیین می‌گردد. بر اساس تحقیقات انجام گرفته توسط سازمان انرژی اتمی، میزان ریسک هر مسیر را بر اساس حجم ترافیکی آن مسیر فرض می‌کنیم (ولایی و وجدانی‌نوذر، ۱۳۹۷؛ جعفری سلیم و همکاران، ۱۳۸۹).

رابطه ۵) $\text{Min } Z_2 = \sum_i \sum_j r_{ij} X_{ij}$

بر طبق فرضیات بالا محدودیت‌های دارای اهمیت در مدل به شرح ذیل است:

– هیچ‌کدام از گروه‌ها (ایستگاه‌های توقف) نباید به نقطه مبدأ و مقصد مسیر متعلق باشند (رابطه ۶).

– هر ایستگاه یا نقطه‌ای که در ارتباط با مبدأ حرکت باشد، دارای ارزش یک است (رابطه ۷).

– هر ارتباطی با مقصد دارای مقدار یک است (رابطه ۸).

رابطه ۶) $\sum_i X_{ij} - \sum_n X_{nj} = 0 \text{ if } j \neq o, d \; ; \forall i \neq j, n \neq j.$

رابطه ۷) $\sum_j X_{oj} = 1 \; \forall j$

رابطه ۸) $\sum_i X_{id} = 1 \; \forall i$

۴. یافته‌های پژوهش

در این تحقیق با توجه به اطلاعات موجود، برای ارزیابی ریسک از دو معیار احتمال و شدت استفاده شده است. برای محاسبه احتمال تصادف Pij ابتدا تعداد حوادثی که ماشین‌های سنگین در یک بازه زمانی داشته‌اند را بر تعداد خودروهای سنگینی که از آن جاده عبور کرده‌اند تقسیم کرده و احتمال تصادف برای هر ماشین سنگین محاسبه می‌شود. بر اساس اطلاعات حوادث جاده‌ای استان همدان در سال‌های اخیر و همچنین میزان تردد شمارهای موجود که در سامانه ۱۴۱ ثبت شده است Pij هر محور به دست می‌آید. شدت Eij هر حادثه نیز از معیار دیگری که اورژانس به نام سطح حادثه استفاده می‌کند نیز به‌عنوان معیار شدت استفاده می‌شود. این معیار در سه سطح E0, E1, E2 مشخص شده است که E0 به‌عنوان کمترین شدت و E2 به‌عنوان بیشترین شدت مطرح است. لازم به ذکر است این اطلاعات بایستی در بازه ۰ تا ۱ ارائه شوند. با مشخص شدن Pij و Eij در هر بازه برآورد ریسک محورهای مواصلاتی استان همدان در فصول مختلف به شرح جدول ۳ برآورد می‌گردد. ضمناً به علت نبود اطلاعات دقیق در دوره بیش از یک سال و همچنین از آنجایی‌که اطلاعات مربوط به تعداد تصادفات در محورهای استان همدان مشخص بوده لیکن مکان دقیق آن ثبت نشده باید از معیار دیگری به نام ریسک ذاتی جاده Nij نیز استفاده نمود. این معیار به این‌گونه است که ابتدا تعداد مجروحین و متوفیان هر محور در هر فصل را در دوره‌هایی که مدنظر است بر طول راه تقسیم کرده و ریسک ذاتی هر محور نیز به‌عنوان یک معیار دیگر به دست می‌آید. معیار دیگری که می‌توان با توجه به در دسترس بودن اطلاعات در نظر گرفت میزان ترافیک عبوری Sij در هر مسیر است که از تقسیم تعداد وسایل نقلیهٔ عبوری در دوره زمانی مدنظر بر تعداد لاین‌ها یا خطهای هر جاده است. در نتیجه ریسک هر مسیر از رابطه ۹ به دست می‌آید که در این رابطه تمامی پارامترهای $P_{ij}, E_{ij}, N_{ij}, S_{ij}$ به‌صورت نرمال شده وجود دارند.

رابطه ۹) $r_{ij} = (Pij.Eij) + Nij + Sij$

ولی از آنجایی که هر یک از پارامترهای بالا دارای اثر متفاوتی در میزان تعیین ریسک هر مسیر هستند لازم است به هر یک از آن‌ها عددی با نام وزن داده شود. در نتیجه رابطه ریسک اولیه به‌صورت زیر رابطه ۱۰ خواهد بود.

رابطه ۱۰) $r_{ij} = W_2(Pij.Eij) + W_3 Nij + W_4 Sij$

از آنجایی که هدف کمینه کردن بحث هزینه‌ها نیز هست از W1 نیز برای تعیین وزن میزان زمان هر مسیر نیز استفاده می‌شود. پس به‌طورکلی ریسک نهایی هر کمان به‌صورت تابع ۱۱ در خواهد آمد. که با توجه به نظرسنجی صورت گرفته از خبرگان وزن هر یک از عوامل را می‌توان به‌صورت جدول ۴ تعیین نمود.

رابطه ۱۱) $Rij = W_1 t_{ij} + W_2(Pij.Eij) + W_3 Nij + W_4 Sij$

جدول ۳. سطح ریسک جمعی محورهای مواصلاتی استان همدان (منبع: یافته‌های تحقیق)

محور	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
همدان- رزن	۰/۰۷۵	۰/۰۷	۰/۰۷۴	۰/۰۵۴
رزن- قزوین	۰/۰۷۴	۰/۰۴۱	۰/۰۷۳	۰/۰۳۱
همدان- ساوه	۰/۰۷	۰/۰۴۸	۰/۰۷	۰/۰۴
همدان- سنندج	۰/۰۴	۰/۱۲۹	۰/۰۴	۰/۰۳۸
همدان- کرمانشاه	۰/۳۷	۰/۱۹	۰/۳۷	۰/۱۱
همدان- ملایر	۰/۰۷۱	۰/۰۸۲	۰/۰۷	۰/۰۴۹
ملایر- اراک	۰/۰۷۳	۰/۱۱	۰/۰۷۲	۰/۰۴
ملایر- بروجرد	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۰۴۹	۰/۰۲۹
آزادراه	۰/۰۴۶	۰/۱۵	۰/۰۴۵	۰/۱۱۵

جدول ٤. تعیین وزن ضرایب تأثیر برحسب نظر خبرگان (منبع: یافته‌های تحقیق)

W_1	W_2	W_3	W_4
۰/۳۵	۰/۴۳	۰/۳	۰/۲۲

لازم به ذکر است همواره یکی از چالش برانگیزترین مسائلی که در بحث ارزیابی معیارها اهمیت دارد تعیین میزان ضریب تأثیر هر یک از آن‌ها است که در این مطالعه میزان این تأثیر بر اساس وزن‌های تخصیص داده شده مشخص شده است. در این خصوص جهت تعیین ضرایب، ابتدا خبرگان در سه حالت نظرات نسبی خود را نسبت به هر یک از معیارها در قالب سه ماتریس تحت عنوان ماتریس مقایسه‌های زوجی ارائه داده و پس از نرمال‌سازی با بهره‌جویی از روش میانگین حسابی، وزن معیارها برآورد شده است (جداول ۵ تا ۱۰).

جدول ۵. حالت اول: ماتریس مقایسه‌های زوجی نظرات خبرگان با توجه کم به ریسک تصادف و دیگر معیارها (منبع: یافته‌های تحقیق)

	مسافت	ریسک ذاتی تصادف	ریسک تصادف وسایط حمل‌ونقل سنگین	جمعیت پیرامون راه
مسافت	۱	۱۰	۱۰	۱۰
ریسک ذاتی تصادف	۰/۱	۱	۰	۰
ریسک تصادف وسایط حمل‌ونقل سنگین	۰/۱	۰	۱	۰
جمعیت پیرامون راه	۰/۱	۰	۰	۱

جدول ٦. برآورد وزن معیارها بر اساس ماتریس مقایسه‌های زوجی حالت اول (منبع: یافته‌های تحقیق)

معیار	مسافت	ریسک ذاتی تصادف	ریسک تصادف وسایط حمل‌ونقل سنگین	جمعیت پیرامون راه
وزن	۱	۰	۰	۰

جدول ۷. حالت دوم: ماتریس مقایسه‌های زوجی نظرات خبرگان با توجه متوسط به ریسک تصادف و دیگر معیارها (منبع: یافته‌های تحقیق)

	مسافت	ریسک ذاتی تصادف	ریسک تصادف وسایط حمل‌ونقل سنگین	جمعیت پیرامون راه
مسافت	۱	۰/۵	۰/۶۶	۱
ریسک ذاتی تصادف	۲	۱	۱	۱
ریسک تصادف وسایط حمل‌ونقل سنگین	۱/۵	۱	۱	۱
جمعیت پیرامون راه	۱	۱	۰/۵	۱

جدول ۸. برآورد وزن معیارها بر اساس ماتریس مقایسه‌های زوجی حالت دوم (منبع: یافته‌های تحقیق)

معیار	مسافت	ریسک ذاتی تصادف	ریسک تصادف وسایط حمل‌ونقل سنگین	جمعیت پیرامون راه
وزن	۰/۱۸	۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۲۱

جدول ۹. حالت سوم: ماتریس مقایسه‌های زوجی نظرات خبرگان با توجه زیاد به ریسک تصادف و دیگر معیارها (منبع: یافته‌های تحقیق)

	مسافت	ریسک ذاتی تصادف	ریسک تصادف وسایط حمل‌ونقل سنگین	جمعیت پیرامون راه
مسافت	۱	۰/۲۵	۰/۵	۰/۲
ریسک ذاتی تصادف	۴	۱	۰/۵	۲
ریسک تصادف وسایط حمل‌ونقل سنگین	۲	۲	۱	۴
جمعیت پیرامون راه	۵	۰/۵	۰/۲۵	۱

جدول ۱۰. برآورد وزن معیارها بر اساس ماتریس مقایسه‌های زوجی حالت سوم (منبع: یافته‌های تحقیق)

معیار	مسافت	ریسک ذاتی تصادف	ریسک تصادف وسایط حمل‌ونقل سنگین	جمعیت پیرامون راه
وزن	۰/۱	۰/۲۷۵	۰/۴۲۵	۰/۲

بنابراین برای هر یک از کمان‌ها یک ریسک کلی با مقدار Rij برآورد می‌شود که در نهایت با استفاده از الگوریتم دیکسترا مسیر بهینه بین مبدأ و مقصد مسیری خواهد بود که کمترین ریسک را دارا است. از آنجایی که تعداد مسیرهای قابل تردد در منطقه مورد مطالعه زیاد بوده و مشخص کردن مسیرهای بهینه بین هر دو نقطه زمان‌بر است، در کل یافته‌ها نشان می‌دهد در راستای مدیریت ریسک مخاطرات انسان‌ساخت حامل‌های مواد خطرناک به‌منظور کاهش پیامدهای مؤثر بر دارایی‌های محیطی، بهتر است مسیرهای زیر در فصول مختلف سال برای حمل مواد خطرناک مورد استفاده قرار نگیرد:

۱. مسیر همدان- بهار- سوباشی و به جای آن از مسیر همدان- بهار- صالح‌آباد- سوباشی استفاده شود.

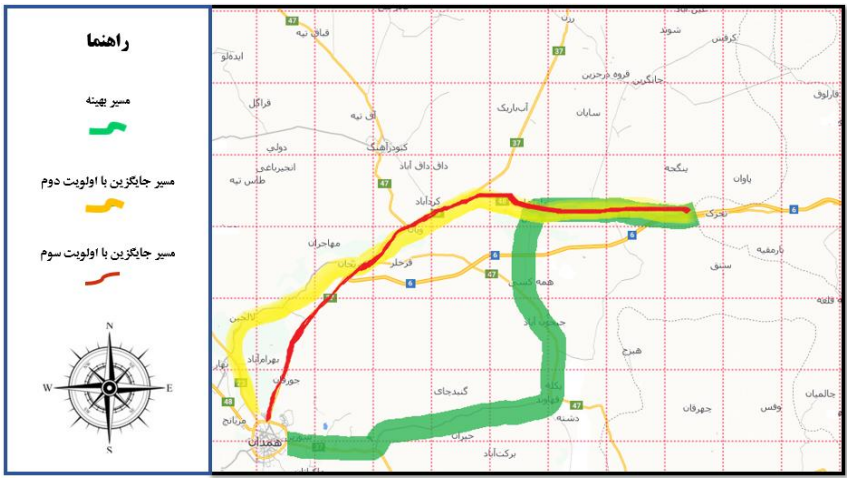
۲. مسیر همدان- کوریجان- تجرک (مسیر بزرگ‌راه) و به جای آن از مسیر همدان- کوریجان- ویان- فامنین- تجرک استفاده شود.

۳. مسیر جوکار- آورزمان- نهاوند و به جای آن از مسیر جوکار- ملایر- آورزمان- نهاوند استفاده شود.

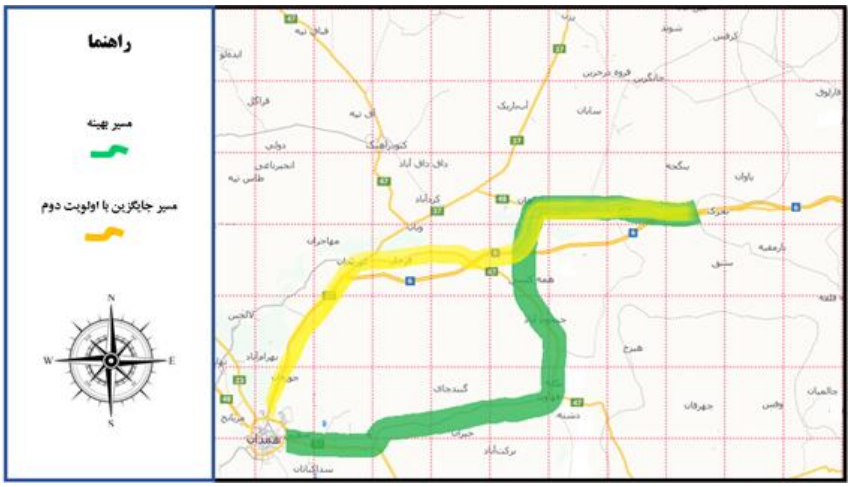
در نهایت از آنجایی که مسیر همدان به تهران بسیار پرتردد و مهم است، طبق برآورد وزن معیارهای تعیین ریسک زیاد بر اساس ماتریس مقایسه‌های زوجی (حالت سوم)، مسیریابی بهینه در این محور در طی فصول مختلف سال طبق شکل‌های (۳، ۴ و ۵) ارائه می‌شود. در این تصویر مسیر سبز بهترین مسیر و مسیر زرد در اولویت دوم و سپس مسیر قرمز به‌عنوان مسیر جایگزین مدنظر است.

۵. بحث

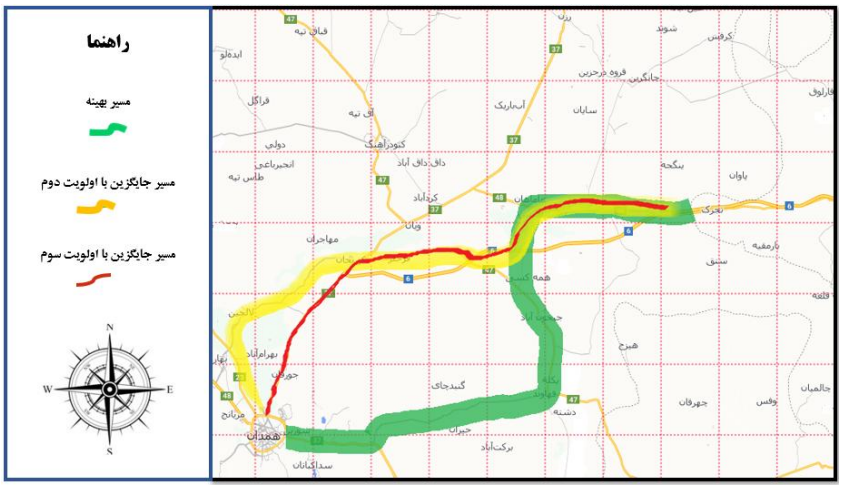
با نگاهی به تحقیقات و پژوهش‌های موجود که برخی از آن‌ها در این پژوهش نیز مورد بررسی قرار گرفت، می‌توان دریافت هر چند تحقیقات زیادی در خصوص ارزیابی ریسک یک سیستم در مواجهه با مخاطرات انسان‌ساخت به‌ویژه مخاطرات ترابری مواد خطرناک وجود دارد، لیکن اکثر محققین با توجه به سیستم مورد مطالعه سعی کرده‌اند از روش متناسب (بسته به دقت و راحتی کار) جهت ارزیابی ریسک و تحلیل آسیب‌پذیری دارایی‌ها استفاده نمایند. به عبارتی در حوزه مخاطرات انسان‌ساخت ترابری مواد خطرناک، مطالعات پیشین بر دو بخش کلی شامل «تعیین و ارزیابی ریسک حمل‌ونقل و شناسایی و تحلیل آسیب‌پذیری دارایی‌ها» جهت ارائه راهکار در کاهش ریسک استوار بوده است، لیکن در این پژوهش، تمرکز پژوهشگران در ارزیابی ریسک مخاطرات انسان‌ساخت ترابری مواد خطرناک، شناسایی پیامدها و ارائه مسیر بهینه تردد به‌منظور کاهش پیامدهای مؤثر بر دارایی‌های محیطی در طی فصول مختلف است و همچنین هدف نهایی پژوهش ارائه مدل و الگویی است که بتوان ضمن برآورد هدف کاربردی، قابل تعمیم به انجام مطالعات مشابه در تمامی مناطق باشد.



شکل ۳. مسیریابی بهینه در فصل بهار و پاییز (منبع: یافته‌های تحقیق)



شکل ٤. مسیریابی بهینه در فصل تابستان (منبع: یافته‌های تحقیق)



شکل ۵. مسیریابی بهینه در فصل زمستان (منبع: یافته‌های تحقیق)

در این راستا مدل و الگوی منتج از پژوهش به شرح شکل ۶ ارائه می‌شود.

شکل ٦. مدل و الگوی ارزیابی ریسک مخاطرات انسان‌ساخت ترابری مواد خطرناک (منبع: یافته‌های تحقیق)

۶. نتیجه‌گیری

فرایند مطالعه در این پژوهش بیانگر این است که مهم‌ترین عوامل تعیین ریسک مخاطرات انسان‌ساخت ترابری مواد خطرناک در هر محور از برآیند پارامترهای تعداد مصدومان تعدیل شده در هر جاده، ریسک ذاتی هر مسیر، تعداد مجروحان ناشی از تصادفات خودروهای سنگین و جمعیت پیرامون مسیر که به‌صورت نرمال استانداردسازی شده‌اند محاسبه می‌شود. البته لازم به ذکر است به‌منظور متناسب‌سازی معیارهای برآورد ریسک، موارد با توجه به نظرات خبرگان، وزن‌دهی شده و همچنین زمان مسافت در هر یک از محورها نیز به‌عنوان یک عامل مهم ضمن وزن‌دهی در محاسبات گنجانده شده است، سپس برحسب نتایج به‌دست آمده و به‌منظور کاهش پیامدهای مؤثر بر دارایی‌های محیطی با استفاده از الگوریتم دیکسترا مسیر بهینه تردد حامل‌های مواد خطرناک در هر بازه زمانی انتخاب می‌شود. نتایج تحقیق در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد، به‌منظور مدیریت و کاهش ریسک ترابری مواد خطرناک (کاهش پیامدهای تأثیرگذار بر دارایی‌های زیست‌محیطی)، بهتر است، از تردد حامل‌های مواد خطرناک در مسیرهای زیر اجتناب شود و جایگزین مدنظر باشد.

۱. مسیر همدان- بهار- سوباشی (به جای آن از مسیر همدان- بهار- صالح‌آباد- سوباشی استفاده کنید).

۲. مسیر همدان- کوریجان- تجرک (مسیر اتوبان همدان- تهران) (به جای آن از مسیر همدان- کوریجان- ویان- فامنین- تجرک استفاده کنید).

۳. مسیر جوکار- آورزمان- نهاوند (به جای آن از مسیر جوکار- ملایر- آورزمان- نهاوند) استفاده شود.

و از آنجایی‌که مسیر همدان به تهران بسیار پرتردد و مهم است. طبق برآورد وزن معیارهای تعیین ریسک زیاد بر اساس ماتریس مقایسه‌های زوجی نظرات کارشناسان، مسیریابی بهینه این محور در فصول مختلف سال با استفاده از الگوریتم دیکسترا با هدف کاهش اثرات بر دارایی‌های زیست‌محیطی در قالب یافته‌های پژوهشی تعیین شده است.

۷. پیشنهادها

همان‌طور که مشخص است، ارزیابی و تحلیل ریسک ترابری مواد خطرناک در این تحقیق، بر پایه شاخص‌هایی مانند «تعداد تصادفات و واژگونی در هر جاده، تعداد عبور مرورها با توجه به تعداد خطوط، شدت حادثه بر اساس داده‌های اورژانس، ریسک ذاتی هر محور به ازای تعداد مجروحان و متوفیان در هر کیلومتر و زمان سفر در هر یک از مسیرها» مورد بررسی قرار گرفته است که بیانگر رویکرد پیامدشناسی در محورهای مواصلاتی است، لذا پیشنهاد می‌گردد برای جامع‌تر شدن پژوهش، در مطالعات آتی شاخص‌هایی مثل ریسک ذاتی وسیله حمل‌ونقل و ریسک ذاتی رانندگان با شناسایی پارامترهای تأثیرگذار نیز مورد توجه قرار گیرد.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد راهنمای رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این تحقیق هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

این پژوهش در راستای مطالعات پایان‌نامه دکتری دانشگاه تهران می‌باشد که توسط دانشجو و زیر نظر استاد راهنما انجام شده است. نویسندگان این مقاله از تمامی متخصصین حوزه حمل‌ونقل و مدیریت بلایای همدان که اطلاعات و دیدگاه‌های ارزشمندی را بدون هیچ چشم‌داشتی برای این مطالعه ارائه کردند تشکر و قدردانی می‌کند.

منابع

آذر، عادل؛ صفارزاده، محمود؛ و احسانی، علی (۱۳۹۱). طراحی مدل ریاضی مسیریابی حمل مواد خطرناک (مورد مطالعه: شبکه راه‌های استان فارس). *مهندسی عمران مدرس*. ۱۲ (۴)، ۲۷-۳۵. http://mcej.modares.ac.ir/article-16-300-fa.html

امیدوار، بابک؛ و وجدانی نوذر، علی (۱۴۰۰). ارزیابی ریسک کیفی زیرساخت حیاتی آب، مطالعه موردی سیستم آبرسانی یک شهر. *دوازدهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران*. مشهد. https://confdirector.com/abshow.php?id=4120

توکلی مقدم، رضا؛ علینقیان، مهدی؛ نوروزی، نرگس؛ و سلامت بخش، علیرضا (۱۳۹۱). حل یک مدل جدید برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایمنی در حمل‌ونقل مواد خطرناک. *مهندسی حمل و نقل*. ۲ (۳)، ۲۲۳-۲۳۷. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086598.1390.2.3.2.7

توکلی مقدم، رضا؛ محمود سلطانی، فرزاد؛ و محمودآبادی، عباس (۱۳۹۲). توسعه مدل ریاضی مسأله مسیریابی حمل‌ونقل مواد سوختی تحت شرایط فازی – مطالعه موردی. *مهندسی حمل و نقل*. ۴ (۳)، ۲۰۹-۲۲۰. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086598.1392.4.3.2.1

جعفری سلیم، بابک؛ باغوند، اکبر؛ وثوق، علی؛ و کرکوتی، علیرضا (۱۳۸۹). انتخاب مسیر بهینه در حمل‌ونقل زباله‌های هسته ای با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیاییGIS . *پنجمین همایش ملی مدیریت پسماند*. مشهد. https://civilica.com/doc/144962

خشایی‌پور، مرتضی؛ نقدی‌زاده، محمدرضا؛ و پارسافرد، محسن. (۱۳۹۱). مسیریابی خودروهای حامل مواد خطرناک در شبکه معابر شهری (مطالعه موردی؛ شهر تهران). *دوازدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک*. تهران. https://civilica.com/doc/200601

زایرزاده، علی؛ مزاری، مهران؛ نادرنژاد، مسعود؛ و اخباری، کامران (۱۳۸۷). ارزیابی عوامل تاثیرگذار در انتخاب شیوه و مسیر حمل‌ونقل مواد خطرناک. *اولین کنفرانس حمل‌ونقل مواد خطرناک و اثرات زیست‌محیطی آن*. تهران. https://civilica.com/doc/51322

وزارت راه و شهرسازی جمهوری اسلامی ایران، سازمان حفاظت محیط زیست. (۱۳۸۰). آیین نامه اجرایی حمل‌ونقل جاده ای مواد خطرناک، *مصوب هیات وزیران*، تهران، ایران. https://rc.majlis.ir/fa/law/print_version/121706

ولایی، محمدرضا؛ (نماینده مشاور طرح)، و وجدانی نوذر، علی (ناظر و همکار طرح) (۱۳۹۷). مسیریابی بهینه حمل‌ونقل مواد خطرناک در محورهای مواصلاتی استان همدان. *اداره کل مدیریت بحران استانداری همدان (کارفرما). دانشگاه بوعلی سینا (مشاور)*. همدان.

هاشم پور، الهام؛ پورعلی، عبدالقادر؛ و هاشم پور، عاطفه (۱۳۹۳). تحلیل و بررسی کارایی اجرای سریال و موازی الگوریتم کوتاه ترین مسیر دایجسترا. *دومین همایش ملی پژوهش‌های کاربردی در علوم کامپیوتر و فناوری اطلاعات*. تهران. https://civilica.com/doc/455375

References

Abkowitz, M., & Cheng, P. D. M. (1988). Developing a risk/cost framework for routing truck movements of hazardous materials. *Accident Analysis & Prevention*, *20*(1), 39–51. https://doi.org/10.1016/0001-4575(88)90063-3

Azar, A., Saffarzadeh, M., & Ehsani, A. (2012). Designing Mathematical Routing Model of Hazardous Materials Transportation (Case Study: the Fars Province Road Network). *MCEJ*; 12 (4), 27-35. http://mcej.modares.ac.ir/article-16-300-fa.html. (in Persian).

Carotenuto, P., Giordani, S., & Ricciardelli, S. (2007). Finding minimum and equitable risk routes for hazmat shipments. *Computers & Operations Research*, 34(5), 1304-1327. https://doi.org/10.1016/j.cor. 2005.06.017

Dijkstra, E.W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269–271. https://doi.org/10.1007/BF01386390

Erkut, E., & Gzara, F. (2008). Solving the hazmat transport network design problem. *Computers & Operations Research*, 35(7), 2234-2247. https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.11.004

Fagel, M. J. (2011). Principles of Emergency Management and Emergency Operations Centers (EOC). *CRC Press*. https://doi.org/10.1201/b10730

Ghaleh, S., Omidvari, M., Nassiri, P., Momeni, M., & Miri Lavasani, S. M. (2019). Pattern of safety risk assessment in road fleet transportation of hazardous materials (oil materials). *Safety Science*, 116, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.039

Goforth, E., Ezzeldin, M., El-Dakhakhni, W., ... (2020). Networkof-networks framework for multimodal hazmat transportation risk mitigation: Application to used nuclear fuel in Canada. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 24(3). https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000505

Guo, J., & Luo, C. (2022). Risk assessment of hazardous materials transportation: A review of research progress in the last thirty years. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 9(4), 571-590. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.08.005

Hashem Pour, E., Pour Ali, A., & Hashem Pour, A. (2014). Analyzing and investigating the efficiency of serial and parallel execution of Dijkstra's shortest path algorithm. *The 2th national conference on applied research in computer science and information technology*. Iran. https://civilica.com/doc/455375/ (in Persian).

IRI. Ministry of Roads and Urban Development (MRUD), Development of Environment (DOE) (2001). Executive Regulations of Road Transportation of Hazardous Materials, *approved by the Council of Ministers*, Tehran, Iran. https://rc.majlis.ir/fa/law/print_version/121706 (in Persian).

Jafari Salim, B., Baghvand, A., Vosough, A., & Karkouti, A. (2010). Choosing the optimal route in nuclear waste transportation using GIS geographic information system. *The 5th national waste management conference*, Mashhad. Iran . https://civilica.com/doc/144962/ [In Persian]

Khashaei Pour, M., Naghdizadeh, M., & Parsafar, M. (2012). Routing of vehicles carrying dangerous substances in the urban road network (case study; Tehran). *The 12th International Conference on Transportation and Traffic Engineering*. Iran . .https://civilica.com/doc/200601 (in Persian).

KiwiRAP. the New Zealand Automobile Association, New Zealand Transport Agency, Ministry of Transport, ACC and New Zealand Police. (2008). *The New Zealand road assessment programme*.

Lewis, T. G. (2020). Critical infrastructure protection in homeland security: *Defending* a networked nation. John Wiley & Sons.

Li, Y., Xu, D., & Shuai, J. (2020). Real-time risk analysis of road tanker containing flammable liquid based on fuzzy Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*, *134*, 36–46. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.030

Loza-Hernandez, L., & Gendreau, M. (2020). A framework for assessing hazmat risk at nodes of transport networks. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020. 101854

Luo, D., Liao, C., & Yu, X. (2019). 2013-2017 statistics and preventive measures of hazardous chemicals transportation accidents in China. *China Public Security (Academy Edition)*, *1*, 28-32.

Mohammadfam, I., Namain, S. G., Gholamizadeh, K., & Borgheipour, H. (2023). Evaluation and management of health and safety risks of chlorine gas in transportation routes. *Health in Emergencies and Disasters Quarterly*, 8(3), 175-184. https://doi.org/10.32598/hdq.8.3.466.1

Omidvar, B., & Vejdani Nozer, A. (2021). Qualitative risk assessment of water infrastructure, Case study: Potable water system of a city, *12th International Congress of Civil Engineering*, 21 to 23 July Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. https://confdirector.com/abshow. php?id=4120 (in Persian).

Saat, M. R., Werth, C. J., Schaeffer, D., Yoon, H., & Barkan, C. P. (2014). Environmental risk analysis of hazardous material rail transportation. *Journal of Hazardous Materials*, 264, 560–569. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.10.044

Tavakoli Moghadam, R., Alinaghian, M., Norouzi, N., & Salamat Bakhsh, A. (2012). Solving a NewVehicle Routing Problem Considering Safety in Hazardous Materials Transportation: AReal- case Study. *Journal of Transporation*

Engineering, 2 (3), 223-237. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086598.1390.2.3.2.7 (in Persian).

Tavakoli Moghadam, R., Mahmoud Soltani, F., & Mahmoudabadi, A. (2013). Development of a Mathematical Model for a Fuel Routing Problem Under a Fuzzy Condition– A Case Study. *Journal of Transporation Engineering*, 4 (3), 209-220. .https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086598.1392.4.3.2.1 [in Persian]

U.S. Department of Transportation (DOT). (1996). Highway routing of hazardous materials guidelines for applying criteria. *National Highway Institute*.

Valaei, M., (Project Consultant Representative), and Vejdani Nozar, A., (Project Supervisor and Collaborator). (2018). Optimal Routing of Hazardous Materials Transportation on Transportation Axes of Hamedan Province. *General Directorate of Disasters Management, Hamadan Governorate (Client). Bu-Ali Sina University (Consultant)*. Hamadan. Iran. (in Persian).

Wang, J. S., Kang, Y. Y., Kwon, C., & Ouyang, Y. (2012). Dual toll pricing for hazardous materials transport with linear delay. Networks *and Spatial Economics*, 12(1), 147–165. https://doi.org/10.1007/s11067-010-9137-5

Xin, C., Letu, Q., & Bai, Y. (2013). Robust optimization for the hazardous materials transportation network design problem. *In International* Conference *on Combinatorial Optimization and Applications* (pp. 373-386). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-44921-9_31

Zayerzadeh, A., Mazari, M., Nadesnejad, M., & Akhbari, K. (2008). Evaluation of influential factors in choosing the method and route of transportation of dangerous substances. *The 1th conference on transportation of dangerous* substances *and its environmental effects*. Iran. https://civilica.com/doc/ 51322/ (in Persian).

Zhao, J. H., & Ke, G. (2019). Optimizing emergency logistics for the offsite hazardous waste management. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, *28*(4), 747-765. https://doi.org/10.1007/s11518-018-5430-y

Zografos, K. G., & Androutsopoulos, K. N. (2004). A heuristic algorithm for solving hazardous materials distribution problems. *European Journal of Operational Research*, *152*(2), 507–519. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)000520