Industrial Management Studies
Vol(issue), PP.
jims.atu.ac.ir
DOI:

ATU PRESS

A Systematic Review of Routing Problems for the Transportation of Biological Samples in Laboratory Networks

Asma Bakhtiari Tavana — Operations and Information Technology Management Dept., Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran ,Iran.

Maghsoud Amiri * — Operations and Information Technology Management Dept., Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran ,Iran.

Amir Yousefli — Industrial Engineering Dept., Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Mohammad Taghi Taghavifard — Operations and Information Technology Management Dept., Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran ,Iran.

Abstract

The transportation of biological specimens constitutes a challenging routing problem in healthcare logistics. Due to the perishable nature of specimens, adherence to transportation requirements regarding time, temperature, and physical conditions is essential. This problem focuses on route planning and scheduling for the collection and transfer of specimens in the shortest possible time without compromising their quality. Despite the critical importance of this issue in healthcare systems and the publication of numerous studies, no systematic review has yet been conducted to provide a comprehensive overview of the current state of prior research. The present study, adopting a systematic literature review approach, seeks to identify, classify, and analyze the existing body of research to highlight research gaps and underexplored topics. Accordingly, after the design of a search protocol, retrieval, and screening of articles, 33 articles were finally selected and analyzed. The findings revealed that the development of dynamic and multi-objective

* Corresponding Author: amiri@atu.ac.ir
How to Cite:

eISSN: 2476-5988 ISSN: 2251-8037 Accepted: Review Received: Original Research

models, the utilization of real-time decision-making, the broader application of innovative technologies such as drones, the Internet of Things, blockchain, and big data analytics, as well as the incorporation of machine learning algorithms, are among the most significant fields that could accelerate research progress in the field of routing and scheduling for biological specimen transportation. By mapping the current state and identifying research gaps, this systematic review provides a sound scientific foundation for future studies and for enhancing the efficiency of biological specimen transportation network.

Introduction

In laboratory networks, some biological samples are transferred from collection centers or laboratories to central laboratories equipped with advanced equipment and devices. This approach leads to economic efficiency and reduces the operational costs of centers. Within such a structure, the routing problem of biological sample transportation between different centers and the central laboratory is of particular importance. The primary objective of this problem is to plan routes and schedules for the collection and transportation of samples in the shortest possible time without compromising their quality. In other words, given the perishable nature of biological samples, compliance with transportation requirements in terms of time, temperature, and physical conditions plays a vital role in preserving the validity of laboratory test results.

Given the importance of this process, numerous studies have been conducted on routing problems related to the transportation of biological samples. However, to date, no review study has been published that specifically examines this domain. Accordingly, the present study adopts a systematic literature review approach to classify and analyze existing studies, identify research gaps and underexplored topics, and ultimately outline potential directions for future research.

Methodology

For this study, a systematic literature review was conducted following the approach proposed by Tranfield et al. (2003). Initially, a search protocol was designed, and the procedures for article retrieval and screening were carried out. Ultimately, 33 relevant articles were selected for analysis. The process of article selection for the critical literature review was conducted in accordance with the PRISMA statement.

Discussion

Due to the lack of real-time access to information in traditional biological sample transportation systems, transportation routes are often predefined and fixed on a weekly or monthly basis. However, given the dynamic nature of biological sample transportation problems, dynamic and flexible resource allocation is essential to adapt to changes in model parameters. Moreover, routing problems for the transportation of biological samples in practice are subject to multiple sources of uncertainty, and neglecting these uncertainties may result in unrealistic or suboptimal solutions. Accordingly, depending on the type of uncertainty, commonly used approaches such as stochastic programming, possibilistic programming, flexible programming, and robust programming can be employed.

In this context, one of the key research directions in the field of dynamic problems is real-time decision-making in scheduling and routing. The development of decision support systems for real-time routing optimization requires digital infrastructures and access to online data, enabling the system to receive inputs instantaneously and process new information rapidly in order to determine visit sequences and sample collection schedules for laboratories. In traditional systems, increasing demand may lead to human errors in the collection and transportation processes of biological samples. The adoption of emerging technologies such as the Internet of Things, GPS, blockchain, machine learning algorithms, and drones enables tracking and monitoring of environmental conditions, secure data storage, route optimization, and rapid and safe sample transportation, thereby significantly improving the accuracy, safety, and efficiency of laboratory networks.

Conclusion

In this study, a systematic literature review on the transportation of biological samples within laboratory networks was conducted in three stages. The growing trend in publications over recent years highlights the increasing importance of this topic as a sensitive and complex logistical problem. Despite this upward trend, no review study providing a comprehensive overview of previous research has yet been reported.

The findings of the present study indicate that the gradual shift from heuristic algorithms toward hybrid algorithms reflects the need for methods capable of simultaneously improving solution quality and computational efficiency. Moreover, the application of machine learning algorithms in recent years has created new opportunities for solving large-scale problems. The classification of articles revealed that most studies have modeled the problem as static and deterministic; however, evidence shows that since 2023, there has been a growing

movement toward dynamic problem modeling. In addition, only a limited number of studies have investigated the use of emerging technologies, including drones, the Internet of Things, blockchain, GPS, and machine learning algorithms, to enhance the speed, safety, traceability, and optimization of biological sample transportation routes.
Overall, given the limited lifespan of biological samples and the necessity of complying with transportation requirements in terms of time, temperature, and physical conditions, it is essential for laboratories to plan routes and schedules accurately by employing modern operations research techniques, machine learning algorithms, and innovative technologies, ensuring that samples are transported on time and with preserved quality.

Keywords: Biological specimen transportation, Routing problem, Dynamic routing problem, Systematic literature review

آماده انتشار

مقاله پژوهشی

مطالعات مدیریت صنعتی
دوره ؟، شماره ؟، نام فصل، سال، ص ص
jims.atu.ac.ir
DOI:

تاریخ دریافت: 00/00/00؛ تاریخ پذیرش: 00/00/00 ISSN:2251-8037 eISSN: 2476-5988

مرور نظام‌مند مسائل مسیریابی برای حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی در شبکه‌های آزمایشگاهی

اسماء بختیاری توانا گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

مقصود امیری * گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

امیر یوسفلی گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

محمدتقی تقوی‌فرد گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

چکیده

حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی یک مسئله مسیریابی چالش‌برانگیز در لجستیک مراقبت‌های بهداشتی محسوب می‌شود. با توجه به ماهیت فاسدشدنی نمونه‌ها، رعایت الزامات حمل‌ونقل از نظر زمان، دما و شرایط فیزیکی آن‌ها ضروری است. این مسئله بر برنامه‌ریزی مسیر و زمان‌بندی برای جمع‌آوری و انتقال نمونه‌ها در کوتاه‌ترین زمان ممکن، بدون کاهش کیفیت آن‌ها تمرکز دارد. با وجود اهمیت حیاتی این موضوع در نظام سلامت و انتشار پژوهش‌های متعدد، تاکنون مرور نظام‌مندی که تصویری جامع از وضعیت موجود تحقیقات پیشین ارائه دهد، انجام نشده است. پژوهش حاضر با رویکرد مرور نظام‌مند ادبیات به شناسایی، طبقه‌بندی و تحلیل مطالعات موجود می‌پردازد تا شکاف‌های پژوهشی و موضوعات کمتر بررسی‌شده مشخص شوند. در این راستا، پس از طراحی پروتکل جستجو، بازیابی و غربالگری مقالات، تعداد 33 مقاله نهایی انتخاب و تحلیل شدند. یافته‌ها نشان داد که توسعه مدل‌های پویا و چندهدفه، بهره‌گیری از تصمیم‌گیری بلادرنگ، استفاده گسترده‌تر از فناوری‌های نوآورانه مانند پهپاد، اینترنت اشیاء، بلاکچین و تحلیل کلان‌داده، و همچنین به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین از مهم‌ترین زمینه‌هایی هستند که می‌توانند روند پیشرفت تحقیقات در حوزه مسیریابی و زمان‌بندی حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی را تسریع نمایند. این مرور نظام‌مند با ترسیم

* نویسنده مسئول: amiri@atu.ac.ir

وضعیت موجود و تبیین شکاف‌های پژوهشی، مبنای علمی مناسبی برای مطالعات آتی و ارتقای کارایی شبکه حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی فراهم می‌آورد.

کلیدواژه‌ها: حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی، مسئله مسیریابی، مسئله مسیریابی پویا، مرور نظام‌مند ادبیات

آماده انتشار

مقدمه

در ارائه خدمات مراقبت‌های بهداشتی، تصمیم‌های مهم تشخیصی و درمانی اغلب بر اساس نتایج آزمایش‌های بالینی اتخاذ می‌شود. این نتایج بر حدود 70 درصد از تصمیم‌های پزشکی تأثیرگذار است. ازاین‌رو، آزمایشگاه‌های بالینی موظف‌اند پردازش نمونه‌های بیولوژیکی، گزارش‌دهی بدون خطا و ارائه نتایج قابل اعتماد را در کوتاه‌ترین زمان ممکن فراهم کنند (Yücel et al., 2013a, 2013b).

نمونه بیولوژیکی، نمونه‌ای از موادی مانند ادرار، خون، بافت، سلول‌ها یا سایر مواد مشتق‌شده از یک موجود زیستی است که برای اهداف تشخیص، درمان، تکثیر یا پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد (National Cancer Institute, n.d).

با توجه به این‌که مراکز مختلف آزمایشگاهی برای تجزیه و تحلیل تمام نمونه‌های جمع‌آوری شده مجهز نیستند، برخی از نمونه‌ها به یک آزمایشگاه مرکزی با قابلیت‌های فنی بالا و مجهز به تجهیزات تخصصی ارسال می‌شود تا پس از انجام تمام آزمایش‌های لازم، نتایج به مراکز ارسال‌کننده اعلام شود (Anaya-Arenas et al., 2016; Rostami et al., 2025). تمرکز تجزیه و تحلیل نمونه‌ها در یک آزمایشگاه واحد، مزایایی از منظر اقتصادی و کنترل کیفیت به همراه دارد. این کار از نقطه نظر اقتصادی، سرمایه‌گذاری‌های مرتبط با تجهیزات فنی و هزینه آنالیز را کاهش می‌دهد، اما مستلزم تلاش لجستیکی قابل توجه برای انتقال تمامی نمونه‌هاست (Anaya-Arenas et al., 2021).

نمونه‌هایی که از مراکز مختلف مانند کلینیک‌ها، مطب‌های پزشکان و بیمارستان‌ها به آزمایشگاه مرکزی منتقل می‌شوند، دارای یک پنجره زمانی برداشت (یعنی از لحظه نمونه‌گیری تا زمان تعطیلی مرکز جمع‌آوری) هستند و با توجه به ماهیت حساس به زمان این نمونه‌ها، تحویل آن‌ها باید در کوتاه‌ترین زمان ممکن صورت گیرد تا فرآیند آزمایش به‌موقع آغاز شود (Zabinsky et al., 2020). نمونه‌های بیولوژیکی طول عمر کوتاهی دارند که بسته به نوع آن معمولاً بین 5 تا 24 ساعت یا بیشتر متغیر است و باید در دمای کنترل شده و تحت شرایط حمل مناسب منتقل شوند تا خواص آن‌ها حفظ گردد. عدم رعایت این الزامات، می‌تواند منجر به تغییر نتایج آزمایش و در نتیجه تشخیص نادرست و درمان نامناسب شود. علاوه بر این، غیرقابل‌استفاده شدن نمونه، بیمار را ناچار به نمونه‌گیری مجدد می‌کند که نه‌تنها فرآیند تجزیه و تحلیل را به تأخیر می‌اندازد، بلکه هزینه‌های کل زنجیره (جمع‌آوری،

حمل و تجزیه و تحلیل) را نیز افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، برای حفظ کیفیت نمونه‌ها ممکن است آزمایشگاه‌های ارسال‌کننده در طول روز چندین بار درخواست انتقال داشته باشند که این امر منجر به افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود (Anaya-Arenas et al., 2016, 2021; Grasas et al., 2014). بنابراین، طراحی یک برنامه حمل‌ونقل کارآمد که هم محدودیت‌های زمانی و هم الزامات ایمنی را رعایت کند، ضروری است.

مسئله حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی[1] در شبکه آزمایشگاهی را می‌توان در قالب یک مسئله مسیریابی تعریف کرد که به برنامه‌ریزی و زمان‌بندی حمل‌ونقل روزانه نمونه‌ها از مراکز نمونه‌گیری یا آزمایشگاهی به آزمایشگاه مرکزی، در شرایط زمانی، دمایی و فیزیکی کنترل‌شده و با هدف حفظ کیفیت و یکپارچگی نمونه‌ها می‌پردازد. به‌طور کلی، مسئله مسیریابی به سازماندهی و تخصیص وسایل نقلیه برای بازدید از مجموعه‌ای از مکان‌های مشخص اطلاق می‌شود (Khoufi et al., 2019).

شبکه آزمایشگاهی مجموعه‌ای سازمان‌یافته و یکپارچه از آزمایشگاه‌هاست که با هدف ارائه خدمات تشخیصی و درمانی سریع به بیماران، تسهیل ارجاع نمونه‌ها و دسترسی به آزمایش‌های تخصصی، به‌طور هماهنگ فعالیت می‌کنند (World Health Organization, 2015). در این پژوهش، منظور از شبکه آزمایشگاهی شبکه‌ای است که همواره شامل آزمایشگاه مرکزی مجهز به تجهیزات پیشرفته، یک یا چند مرکز دیگر مانند مراکز نمونه‌گیری (دائمی، موقت یا سیار)، آزمایشگاه‌های محلی، کلینیک‌ها یا مطب پزشکان، و در صورت لزوم مراکز انتقال[2] است. مراکز انتقال مسئولیت پردازش اداری، تجمیع نمونه‌ها، و در صورت نیاز انجام سانتریفیوژ را بر عهده دارند، در حالی که سایر مراکز صرفاً مسئول انجام عملیات نمونه‌گیری هستند. از آنجا که این مراکز فاقد تجهیزات لازم برای انجام آزمایش‌های تخصصی‌اند، نمونه‌ها باید در بازه زمانی مشخص و با رعایت الزامات ایمنی به آزمایشگاه مرکزی منتقل شوند.

فرآیند حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی دارای سه ویژگی اساسی است که بهینه‌سازی مسئله مسیریابی در این حوزه را دشوار می‌سازد. نخست آن‌که طول عمر نمونه‌ها معمولاً کوتاه‌تر از دوره جمع‌آوری در یک مرکز نمونه‌گیری است و به همین دلیل لازم است هر مرکز بیش از یک بار در روز بازدید شود. دوم، طول عمر هر نمونه بر اساس زمان تولید آن

[1] Biological Samples Transportation Problem
[2] Transit Centers

(لحظه جمع‌آوری از بیمار) تعریف می‌شود؛ از این رو، محدودیت زمان تحویل به زمان تولید وابسته است و نمی‌توان آن را مشابه محدودیت‌های کلاسیک زمان سفر در نظر گرفت. سومین ویژگی آن است که مدت مجاز یک مسیر توسط نمونه‌ای تعیین می‌شود که زودتر فاسد می‌شود، بنابراین طول مسیر به جواب وابسته خواهد بود. این سه ویژگی در مجموع وابستگی متقابل شدیدی میان تصمیمات مسیریابی (توالی بازدیدها) و تصمیمات برداشت (از نظر زمان و تعداد) ایجاد می‌کنند (Ocampo-Giraldo et al., 2024).

با توجه به اهمیت این فرآیند، پژوهش‌های متعددی در زمینه مسیریابی برای حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی انجام شده است. با این حال، تاکنون مطالعه‌ای مروری که به‌طور خاص این حوزه را بررسی کند، منتشر نشده است. بر همین اساس، پژوهش حاضر با رویکرد مرور نظام‌مند ادبیات به شناسایی، طبقه‌بندی و تحلیل مطالعات موجود می‌پردازد. به بیان دیگر، مقالات منتخب بر اساس معیارهایی همچون نوع مدل برنامه‌ریزی ریاضی، تعداد و نوع توابع هدف، نوع مسئله مسیریابی، رویکرد مواجهه با عدم قطعیت، ماهیت ایستا یا پویا بودن مسئله، تکنیک حل و فناوری‌های به‌کاررفته طبقه‌بندی و تحلیل می‌شوند. هدف از این مرور، ارائه تصویری جامع از مطالعات این حوزه، شناسایی شکاف‌های پژوهشی و موضوعات کمتر بررسی‌شده و در نهایت، ترسیم مسیرهای بالقوه برای تحقیقات آینده است. در این راستا، پس از گزینش نظام‌مند مقالات، تحلیل توصیفی به منظور بررسی روند تاریخی، توزیع مقالات بر اساس ناشران و مجلات مرتبط صورت می‌گیرد. سپس، با بهره‌گیری از تحلیل محتوای متن مقالات، به سؤالات پژوهش پاسخ داده می‌شود.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در مطالعات مرتبط با حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی، بسته به نوع نمونه، محدودیت‌های زمانی و شرایط حمل‌ونقل، مدل‌های مختلفی از مسائل مسیریابی مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ از جمله مسئله فروشنده دوره‌گرد[1]، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه[2] و مسئله جهت‌یابی تیمی[3]. TSP به مسئله‌ای اطلاق می‌شود که در آن یک فروشنده از یک شهر آغاز کرده، باید از شهرهای دیگر بازدید کند و با حداقل هزینه یا مسافت به نقطه شروع بازگردد (Zhou et al., 2023). VRP نخستین بار در سال 1959 توسط Dantzig and Ramser در ادبیات

[1] Travelling Salesman Problem (TSP)
[2] Vehicle Routing Problem (VRP)
[3] Team Orienteering Problem (TOP)

تحقیق در عملیات معرفی شد. این مسئله تعمیم یافته TSP است و هدف اصلی آن یافتن مسیرهای بهینه وسایل نقلیه برای خدمت‌دهی به مشتریان پراکنده در مناطق مختلف جغرافیایی با حداقل هزینه کل سفر است (Zhang & Woensel, 2023). TOP نیز نوعی مسئله مسیریابی است که در آن هدف تعیین مسیر برای هر عضو تیم به منظور بیشینه‌سازی امتیاز جمع‌آوری‌شده در یک بازه زمانی محدود است (Tlili et al., 2022).

جمع‌آوری و حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی نخستین بار توسط McDONALD (1972) در قالب یک مطالعه موردی مورد توجه قرار گرفت. مک دونالد این مسئله را به صورت یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با هدف به حداقل رساندن کل زمان سفر فرموله کرد. با گذشت چند دهه، در سال 2012، وزارت بهداشت و خدمات اجتماعی استان کبک[1] در کانادا با ایجاد خوشه‌های خدماتی، فرآیند تجزیه‌وتحلیل نمونه‌ها را متمرکز ساخت. هر خوشه دارای یک آزمایشگاه منطقه‌ای بود که مسئولیت تجزیه‌وتحلیل نمونه‌های دریافتی از مراکز مختلف جمع‌آوری را بر عهده داشت. این آزمایشگاه‌های منطقه‌ای به تجهیزات پیشرفته و ظرفیت کافی برای پردازش کلیه نمونه‌ها مجهز بودند. از آنجا که نمونه‌ها به سرعت فاسد می‌شوند، این ساختار نیازمند برنامه‌های حمل‌ونقل کارآمدی برای رعایت محدودیت‌های زمانی دقیق است (Ocampo-Giraldo et al., 2024). از سال 2013 به بعد، توجه جامعه علمی به این مسئله افزایش یافت. در همین راستا، Anaya-Arenas و همکاران (2016) مسئله حمل‌ونقل نمونه‌های زیست‌پزشکی را با الهام از الزامات وزارت بهداشت و خدمات اجتماعی کبک به طور رسمی معرفی کردند. این مسئله در ادامه توسط Naji-Azimi و همکاران (2016)، Anaya-Arenas و همکاران (2021)، Mazzanti و همکاران (2024) و Ocampo-Giraldo (2024) توسعه یافت. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کانادا بیش‌ترین سهم مطالعات موردی را به خود اختصاص می‌دهد.

مسئله مسیریابی در دنیای واقعی اغلب با داده‌های پویا و نامطمئن روبه‌روست. در پاسخ به این چالش، VRP پویا[2] در اواخر دهه 1970 مطرح شد. با این حال، به دلیل محدودیت‌های فناوری، توان محاسباتی پایین و نبود سیستم‌های بلادرنگ این حوزه در آن زمان برای پژوهشگران چندان جذاب نبود. اما امروزه، با پیشرفت چشمگیر سیستم‌های رایانه‌ای، معرفی

[1] Quebec
[2] Dynamic Vehicle Routing Problems (DVRP)

سیستم موقعیت‌یابی جهانی[1]، استفاده گسترده از تلفن‌های هوشمند و نیز سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی[2]، امکان جمع‌آوری و پردازش داده‌های بلادرنگ و ردیابی و مدیریت ناوگان به صورت بلادرنگ و مقرون‌به‌صرفه فراهم شده است (Ojeda Rios et al., 2021; Pillac et al., 2013). DVRP با این ویژگی شناخته می‌شود که داده‌های ورودی تا حدی از پیش مشخص‌اند و در حین انجام عملیات به صورت پویا تغییر می‌کنند. پویایی یکی از ویژگی‌های ذاتی بسیاری از کاربردهای دنیای واقعی است؛ زیرا اطلاعاتی مانند ورود درخواست‌ها، موقعیت مشتریان، پنجره‌های زمانی و سایر پارامترهای مرتبط همواره به طور کامل در فرآیند برنامه‌ریزی مسیر در دسترس نیستند (Zhang & Woensel, 2023).

در سال‌های اخیر، مقالات مروری متعددی برای بررسی مشارکت‌های علمی در حوزه مسائل مسیریابی منتشر شده‌اند. جدول 1، با ارائه جزئیاتی نظیر بازه زمانی، تعداد مقالات بررسی شده، نوع مسئله مسیریابی و تمرکز پژوهش، مروری کلی بر پژوهش‌های مروری پیشین فراهم می‌آورد. بر اساس این جدول، تنها Braekers و همکاران (2016) بر طبقه‌بندی ساختاریافته مسئله کلاسیک مسیریابی وسیله نقلیه متمرکز بوده‌اند؛ در حالی‌که سایر مطالعات، هر یک به نوع خاصی از این مسئله پرداخته‌اند، از جمله VRP سبز، VRP در لجستیک معکوس، VRP در زنجیره‌تأمین سرد، VRP پویا، VRP برای مهار همه‌گیری، VRP در شبکه‌های توزیع چندسطحی و VRP جمع‌آوری زباله. همچنین، Cheikhrouhou and Khoufi (2021) مهم‌ترین کاربردهای واقعی مسئله فروشنده دوره‌گرد چندگانه را بررسی کرده و یک طبقه‌بندی از پژوهش‌های اخیر ارائه داده‌اند. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون هیچ پژوهشی به‌طور خاص به مرور نظام‌مند مسائل مسیریابی در حوزه حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی نپرداخته است؛ بنابراین، پژوهش حاضر نخستین پژوهشی است که به صورت نظام‌مند به بررسی ادبیات این حوزه می‌پردازد و می‌تواند به عنوان مبنای علمی برای تحقیقات آتی در زمینه مسیریابی و زمان‌بندی حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی در شبکه آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد.

[1] Global Positioning System (GPS)
[2] Geographic Information Systems (GIS)

جدول 1. مروری بر مقالات مروری پیشین در حوزه مسائل مسیریابی

نویسنده و سال	بازه زمانی	تعداد مقالات	نوع مسئله مسیریابی	رویکرد مرور نظام‌مند ادبیات	تمرکز پژوهش
Braekers et al. (2016)	2015-2009	277	مسئله مسیریابی وسیله نقلیه	–	مرور طبقه‌بندی‌شده‌ای از ادبیات VRP، ارائه اولین طبقه‌بندی ساختاریافته از ادبیات VRP
Awad et al. (2021)	2020-2008	65	مسیریابی وسیله نقلیه در لجستیک زنجیره‌تأمین مواد غذایی سرد	رویکرد ارائه شده توسط Tranfield et al. (2003)	مروری نظام‌مند مطالعات اخیر در مدل‌سازی توزیع محصولات حساس به دما مانند مواد غذایی، بررسی عوامل کیفی مورد استفاده برای مدل‌سازی افت کیفیت محصولات سرد، تحلیل مدل‌های بهینه‌سازی همراه با توابع هدف و محدودیت‌های مدل VRP زنجیره‌تأمین سرد
Cheikhrouhou & Khoufi (2021)	2020-2007	45	مسئله فروشنده دوره‌گرد چندگانه	–	ارائه مهم‌ترین کاربردهای واقعی مسئله فروشنده دوره‌گرد چندگانه، تحلیل انواع مختلف MTSP و شرح رسمی آنها، مرور جامع مشارکت‌های اخیر در زمینه وسایل نقلیه زمینی و هوایی همراه با تأکید بر حوزه کاربردی و رویکرد حل مورد استفاده، ارائه یک طبقه‌بندی از پژوهش‌های اخیر
Moghdani et al. (2021)	2019-2006	309	مسئله مسیریابی	–	مرور کامل و به‌روز مطالعات VRP سبز، ارائه

آماده انتشار

		وسیله نقلیه سبز			انواع VRP سبز، بررسی رویکردهای روش‌شناختی و اهداف مختلف
Asghari & Mirzapour Al-e-hashem (2021)	2020–2000	313	مسئله مسیریابی وسیله نقلیه سبز	رویکرد ارائه شده توسط Cooper (2010)	مرور نظام‌مند و طبقه‌بندی مطالعات VRP سبز (وسایل نقلیه معمولی، الکتریکی و هیبریدی)، بررسی تکنیک‌های فرموله‌بندی، روش‌های حل و حوزه‌های کاربردی
Lin et al. (2022)	2021–2009	46	بهینه‌سازی مسیریابی وسایل نقلیه برای مهار همه‌گیری	–	مرور جامع ادبیات VRP در بستر یک بیماری همه‌گیر، شناسایی جدیدترین اقدامات پیشگیرانه برای جلوگیری از شیوع کووید-19 از منظر تحویل، یافتن روش‌های ایده‌آل اجرای عملیات تحویل در راستای مهار بیماری همه‌گیر
Sar & Ghadimi (2023)	2022–2000	109	مسئله مسیریابی وسیله نقلیه در عملیات لجستیک معکوس	–	تحلیل دقیق پایداری سبز و اجتماعی و تعیین برخی خلاء های مهم، تحلیل جامع رویکردهای مدل‌سازی تا تکنیک‌های حل مسئله و از انواع مختلف VRP تا انواع مختلف زباله و بخش‌های صنعتی، تحلیل بخشی بر اساس ارزیابی مطالعات موردی
Zhang & Woensel (2023)	2022–1980	118	مسئله مسیریابی وسیله نقلیه	–	مرور نظام‌مند پژوهش‌های مرتبط با VRP پویا، طبقه‌بندی جدید VRP پویا بر

آماده انتشار

		پویا با درخواست‌های تصادفی			اساس سه معیار منبع پویایی، نوع درخواست و افق برنامه‌ریزی، ارائه دیدگاه جدید برای مرور VRP پویا (استراتژی‌های تصمیم‌گیری) و بررسی تأثیرات و روش‌های پیاده‌سازی آن‌ها، رویکردهای حل مسئله
Nielsen et al. (2024)	2023-1985	382	مسائل و مدل‌های مسیریابی وسیله نقلیه در شبکه‌های توزیع چند‌سطحی	رویکرد ارائه شده توسط Fahimnia et al. (2015)	استفاده از ابزار کتاب‌سنجی و تحلیل شبکه برای نگاشت نظام‌مند ادبیات، شناسایی پنج خوشه برای مرور نظام‌مند (لجستیک سبز و تحلیل تصمیم‌گیری، زمان‌بندی و بهینه‌سازی موجودی، VRP برای لجستیک شهری، مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی، لجستیک خروجی و خدمات مشتری)
Li et al. (2025)	2024-2020	130	مسئله مسیریابی وسیله نقلیه جمع‌آوری زباله پایدار	رویکرد ارائه شده توسط Hannan et al(2020) .	مرور گسترده مطالعات VRP جمع‌آوری زباله، بررسی طبقه‌بندی زباله، ویژگی‌های مدل، توابع هدف و روش‌های حل، ایجاد ارتباط بین VRP جمع‌آوری زباله و اهداف توسعه پایدار

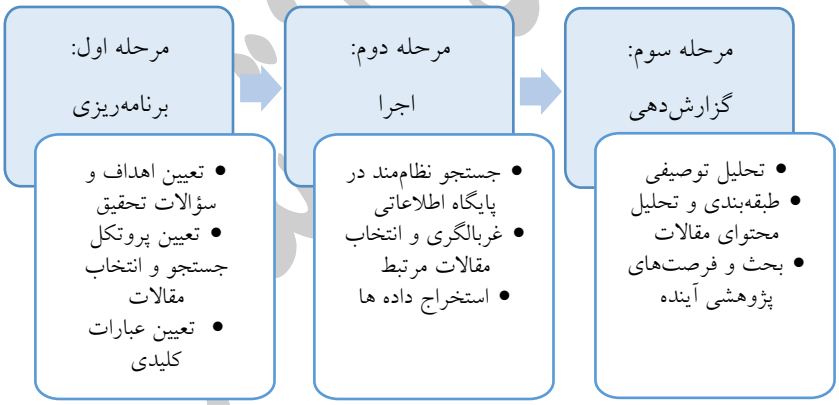
آماده انتشار

روش

برای انجام این پژوهش از روش مرور نظام‌مند ادبیات استفاده شد. به بیان دیگر، به منظور کاهش سوگیری از طریق جستجوی جامع مطالعات، این روش به عنوان فرآیندی علمی، تکرارپذیر و شفاف به کار گرفته شد (Tranfield et al., 2003). شکل 1 مراحل اجرای مرور نظام‌مند ادبیات در حوزه مورد بررسی را بر اساس رویکرد ارائه شده توسط Tranfield و همکاران (2003) نشان می‌دهد. در راستای دستیابی به اهداف پژوهش حاضر، سؤالات زیر مطرح گردید:

1. چه رویکردهایی برای مدل‌سازی در مطالعات مورد بررسی به کار رفته است؟
2. چه تکنیک‌هایی برای حل مدل‌های ارائه شده مورد استفاده قرار گرفته است؟
3. از چه نوع فناوری‌های نوآورانه‌ای در حوزه حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی بهره گرفته شده است؟

شکل 1. مراحل انجام مرور نظام‌مند ادبیات



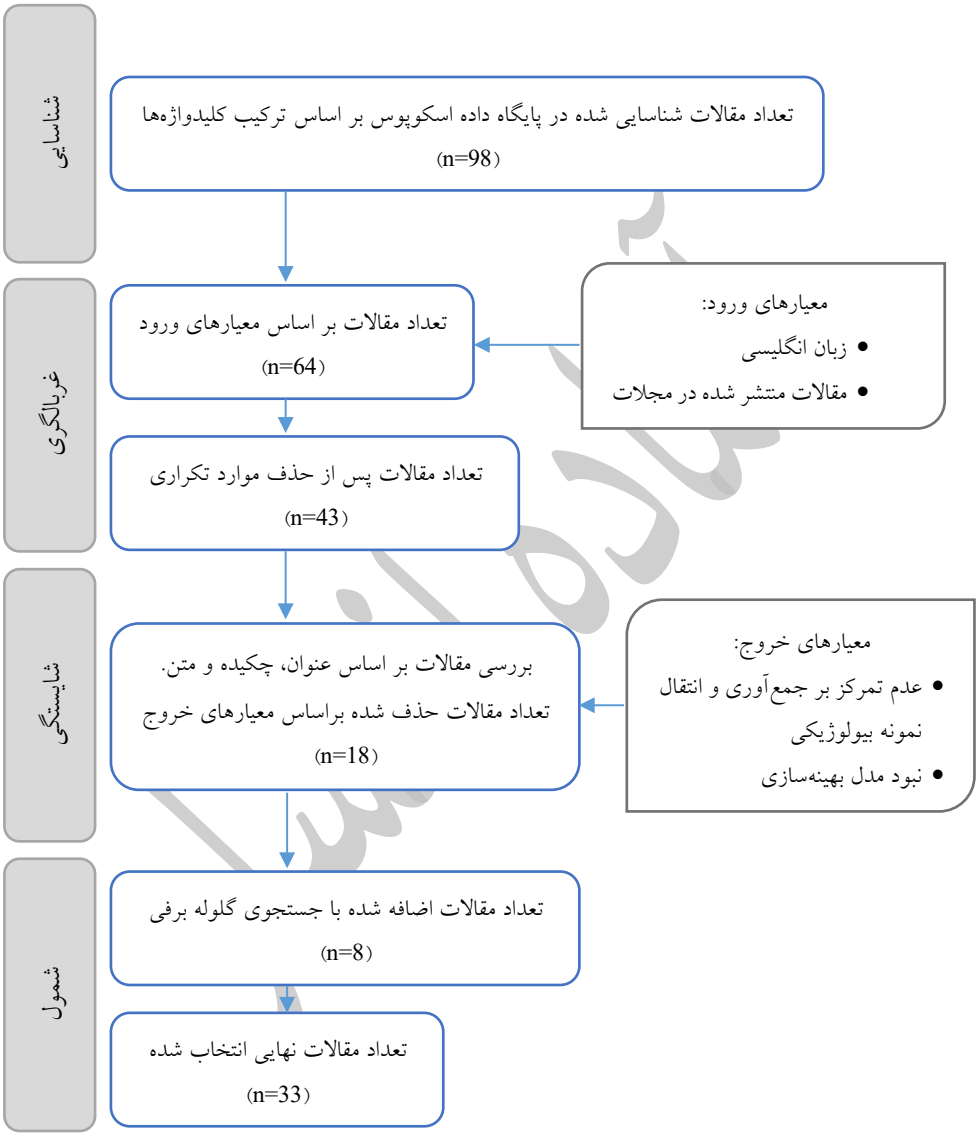
در شکل 2، یک نمایش گرافیکی از فرآیند انتخاب مقالات برای مرور انتقادی ادبیات، مطابق با بیانیه پریزما[1] ارائه شده است. این بیانیه شامل چهار مرحله است: شناسایی، غربالگری، شایستگی و شمول. در مرحله شناسایی، تعداد 98 مقاله اولیه با استفاده از ترکیب‌های مختلف واژگان کلیدی (جدول 2) در پایگاه اطلاعاتی اسکوپوس بازیابی شد. در مرحله غربالگری، با اعمال معیارهای ورود شامل مقالات منتشر شده در مجلات علمی و نگارش به زبان

[1] PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses)

انگلیسی، 34 مقاله حذف گردید. از میان مقالات باقی‌مانده، 21 مقاله به دلیل تکراری بودن کنار گذاشته شد و بدین ترتیب 43 مقاله برای بررسی‌های بعدی در نظر گرفته شد. در مرحله شایستگی، با بررسی عنوان، چکیده و متن مقالات، 18 مقاله غیرمرتبط از فرآیند مرور انتقادی بر اساس معیارهای خروج خارج شدند. معیارهای خروج شامل عدم تمرکز بر جمع‌آوری و انتقال نمونه بیولوژیکی و نیز نبود مدل بهینه‌سازی بود. سپس به‌منظور غنی‌سازی مجموعه مقالات مرتبط، از روش گلوله برفی استفاده شد؛ به این صورت که منابع و استنادهای مقالات منتخب بررسی گردید و در نتیجه 8 مقاله دیگر به فهرست نهایی اضافه شد. درنهایت، 33 مقاله نهایی برای تحلیل و مرور انتقادی انتخاب گردید.

آماده انتشار

شکل 2. فرآیند گزینش مقالات (جریان پریزما)



جدول 2. عبارات کلیدی

بازه زمانی	زمینه جستجو	تعداد مقالات	عبارات کلیدی
نامحدود	عنوان، چکیده و واژگان کلیدی	31	"Vehicle Routing" and "Biological Sample" or "Biomedical Sample" or "Medical Sample" or "Blood Sample"
		18	"Vehicle Routing" and "Sample Transportation" or "Sample Collection"
		15	"Vehicle Routing" and Specimen
		34	Routing and "Sample Collection" or "Specimen Collection"

یافته‌ها

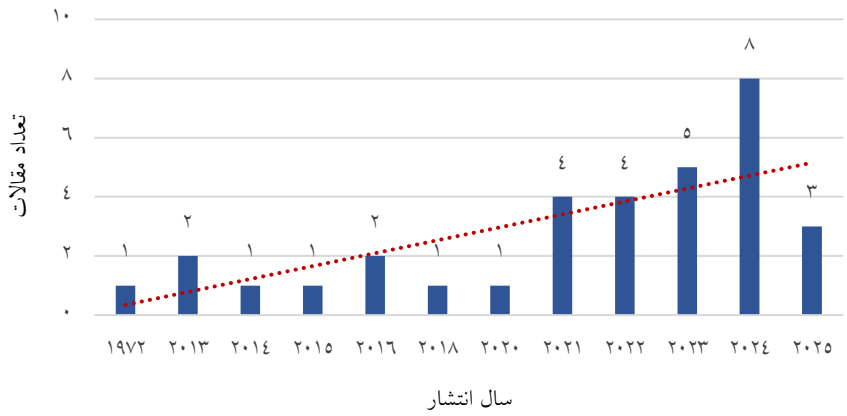
در این بخش ابتدا تحلیل توصیفی شامل اطلاعاتی مانند توزیع مقالات بر اساس سال، ناشر و محبوب‌ترین مجلات هر ناشر ارائه می‌شود. در ادامه، طبقه‌بندی و تحلیل محتوای مقالات به منظور پاسخ‌گویی به سؤالات پژوهش انجام می‌گیرد.

تحلیل توصیفی

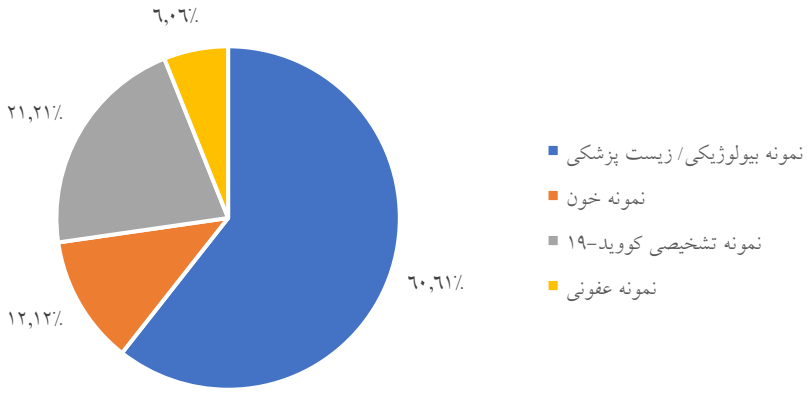
شکل 3 روند تعداد مقالات منتشر شده در مجلات علمی را طی بازه زمانی 1972 تا 2025 نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، تعداد مقالات در این دوره به‌طور کلی روندی افزایشی داشته است، به‌خصوص در سال 2024، که بیشترین تعداد مقالات (نزدیک به 8 مقاله) در مجلات مختلف منتشر شده است. همچنین، حدود 73 درصد از کل مقالات مربوط به سال‌های پس از 2021 است. این روند افزایشی پس از سال 2021، احتمالاً ناشی از شیوع جهانی ویروس کووید-19 و اعلام رسمی پاندمی از سوی سازمان بهداشت جهانی در سال 2020 است. با آغاز شیوع جهانی این ویروس، در سال‌های 2021، 2022، 2023 و 2025 مقالاتی در حوزه مسیریابی حمل‌ونقل نمونه‌های تشخیصی کووید-19 منتشر شده‌اند که سهم آن‌ها از کل مطالعات این حوزه 21/21 درصد است (شکل 4). اهمیت این پژوهش‌ها در آن است که در شرایط اضطراری اپیدمی، جمع‌آوری و انتقال به‌موقع نمونه‌های آزمایش کووید-19 به مراکز تخصصی آزمایشگاهی برای تشخیص زودهنگام افراد مشکوک و کنترل شیوع ویروس، امری حیاتی است. علاوه‌براین، از آنجا که نظارت و کنترل بیماری‌های عفونی نیازمند جمع‌آوری و انتقال کارآمد نمونه‌ها است، دو مقاله (Fu &

(Kang, 2024; Kang & Fu, 2024) به‌طور خاص بر حمل‌ونقل نمونه‌های عفونی مرتبط با بیماری‌های واگیر تمرکز داشته‌اند.

شکل 3. توزیع مقالات بر اساس سال



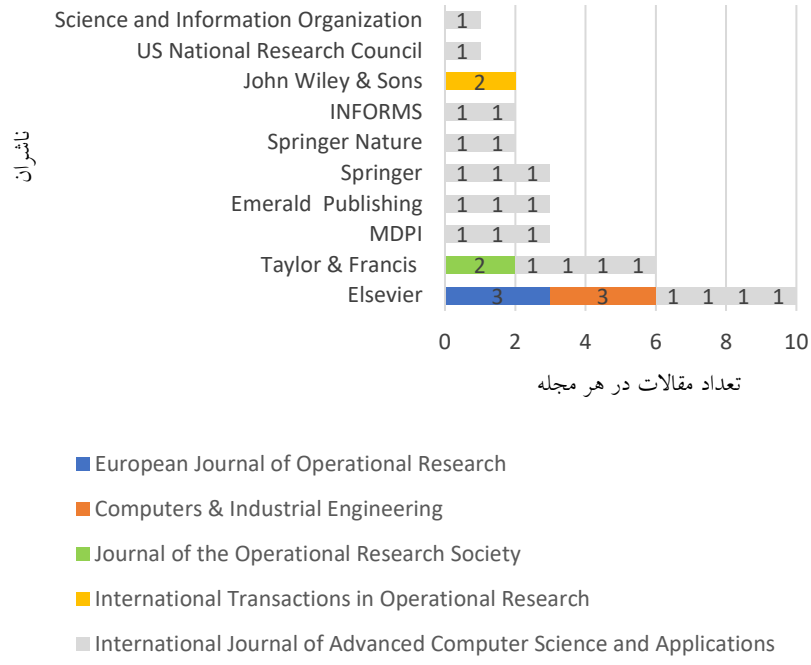
شکل 4. درصد مقالات منتشر شده بر اساس نوع نمونه‌های زیستی



شکل 5 نمودار توزیع مقالات جمع‌آوری و انتقال نمونه بیولوژیکی را بر اساس ناشران و مجلات مرتبط با هر ناشر نشان می‌دهد. مقالات این حوزه در 27 مجله مختلف منتشر شده

است که در این نمودار تنها چهار مجله که بیشترین تعداد مقالات را منتشر کرده‌اند، با رنگ‌های متفاوت مشخص شده‌اند. بر اساس شکل، مجله‌های "Computers & Industrial Engineering" و "European Journal of Operational Research" بیشترین سهم انتشار را در این حوزه به خود اختصاص داده‌اند. همچنین، با توجه به اختلاف قابل توجه، ناشر Elsevier بیشترین درصد مقالات منتشر شده در این حوزه (تقریباً 30 درصد) را دارا است. پس از آن، ناشر Taylor & Francis از نظر تعداد و درصد مقالات انتشار یافته در رتبه دوم قرار دارد. به‌طورکلی، توزیع مقالات در مجلات مختلف نشان می‌دهد که حوزه موضوعی مورد بررسی، در مجموعه‌ای گسترده از انتشارات علمی معتبر مورد توجه قرار گرفته است.

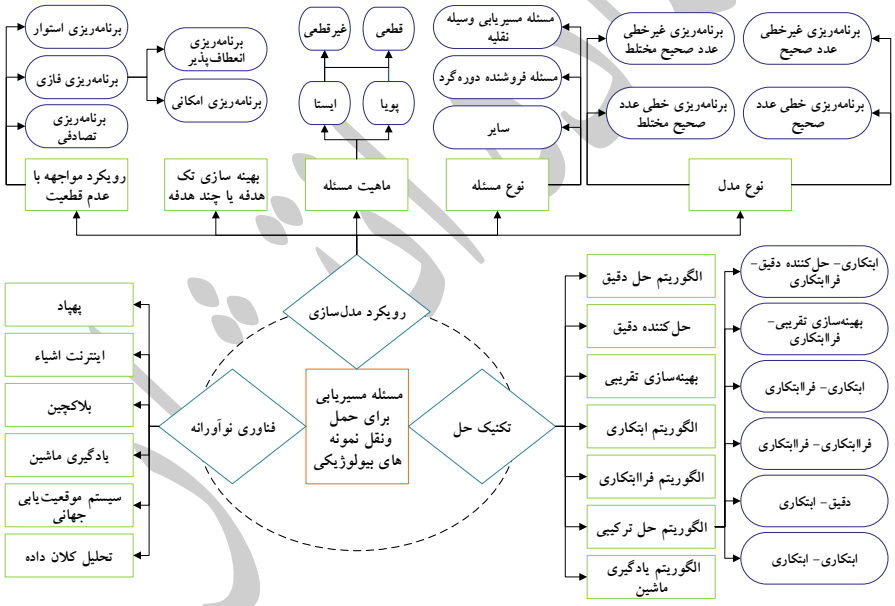
شکل 5. توزیع مقالات بر اساس هر ناشر و مجله‌های آن



طبقه‌بندی و تحلیل محتوای مقالات

شکل 6 چارچوب مفهومی ابعاد مسئله مسیریابی برای حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی را نشان می‌دهد. بر اساس این چارچوب، مقالات منتخب طبقه‌بندی و تحلیل شده‌اند. ابعاد اصلی مورد توجه شامل رویکرد مدل‌سازی، تکنیک‌های حل و فناوری‌های نوآورانه است. در خصوص رویکرد مدل‌سازی، چند جنبه کلیدی مد نظر قرار گرفته است: نوع مدل برنامه-ریزی ریاضی، نوع مسئله مسیریابی، تعداد و نوع توابع هدف، رویکرد مواجهه با عدم قطعیت، و همچنین ماهیت ایستا یا پویا بودن مسئله. طبقه‌بندی مقالات بر اساس این ابعاد در جدول 3 ارائه شده است.

شکل 6. چارچوب مفهومی ابعاد مسئله مسیریابی برای حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی



جدول 3. طبقه‌بندی مطالعات انجام شده در زمینه مسئله مسیریابی برای حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی

نویسنده و سال	نوع مسئله				تعداد تابع هدف		نوع مدل	ماهیت مسئله		وضعیت پارامترها		تکنیک حل	فناوری نوآورانه
	VRP	TSP	سایر		تک‌هدفه	چندهدفه		ایستا	پویا	قطعی	غیرقطعی		
McDONALD (1972)	✓	×	×		✓	×	×	✓	×	✓	×	ابتکاری	×
Yücel et al. (2013a)	×	×	✓		✓	×	×	✓	×	✓	×	بهینه‌سازی تقریبی	×
Yücel et al. (2013b)	×	×	✓		✓	×	MILP	✓	×	✓	×	ابتکاری	×
Grasas et al. (2014)	✓	×	×		✓	×	ILP	✓	×	✓	×	فراابتکاری	×
Wang et al. (2015)	✓	×	×		✓	×	MILP	✓	×	×	✓	ترکیبی	×
Anaya-Arenas et al. (2016)	✓	×	×		✓	×	MILP	✓	×	✓	×	ابتکاری	×
Naji-Azimi et al. (2016)	✓	×	×		×	✓	MILP	✓	×	✓	×	ابتکاری	×
Elalouf et al. (2018)	✓	×	×		✓	×	MILP	✓	×	✓	×	ترکیبی	×
Zabinsky et al. (2020)	✓	×	×		✓	×	MILP	✓	×	✓	×	ابتکاری	×
Anaya-Arenas et al. (2021)	✓	×	×		✓	×	MILP	✓	×	✓	×	فراابتکاری	×
Elalouf et al. (2021)	✓	×	×		×	×	×	✓	×	×	✓	بهینه‌سازی تقریبی	×
Haitam et al. (2021)	✓	×	×		✓	×	MILP	✓	×	✓	×	فراابتکاری	×
Ozkan and Atli (2021)	✓	×	×		✓	×	MILP	✓	×	✓	×	حل‌کننده دقیق	✓
Smith et al. (2022)	✓	×	×		×	✓	MILP	✓	×	✓	×	فراابتکاری	×
Benini et al. (2022)	✓	×	×		✓	×	MILP	✓	×	✓	×	ترکیبی	×
Ozdemir et al. (2022)	✓	×	×		×	✓	MINLP	✓	×	✓	×	ترکیبی	×
Tlili et al. (2022)	×	×	✓		✓	×	ILP	✓	×	✓	×	ترکیبی	×

نویسنده و سال	نوع مسئله			تعداد تابع هدف		نوع مدل	ماهیت مسئله		وضعیت پارامترها		تکنیک حل	فناوری نوآورانه
	VRP	TSP	سایر	تک‌هدفه	چندهدفه		ایستا	پویا	قطعی	غیرقطعی		
Gibson et al. (2023)	✓	×	×	✓	×	MILP	×	✓	×	✓	دقیق	×
Oakey et al. (2023)	✓	×	×	×	✓	ILP	✓	×	✓	×	ترکیبی	×
Wolfinger et al. (2023)	×	×	✓	✓	×	MILP	✓	×	✓	×	فراابتکاری	×
Maji et al. (2023)	×	✓	×	✓	×	ILP	✓	×	✓	×	فراابتکاری	×
Zhou et al. (2023)	×	✓	×	✓	×	ILP	✓	×	✓	×	ترکیبی	×
Mazzanti et al. (2024)	✓	×	×	✓	×	MILP	✓	×	✓	×	ترکیبی	×
Zhao et al. (2024)	✓	×	×	×	✓	MINLP	×	✓	✓	×	فراابتکاری	×
Heidari et al. (2024)	✓	×	×	✓	×	MILP	×	✓	×	✓	ترکیبی	✓
Huang et al. (2024)	✓	×	×	✓	×	ILP	✓	×	✓	×	فراابتکاری	×
Kang and Fu (2024)	✓	×	×	×	✓	INLP	✓	×	✓	×	فراابتکاری	✓
Fu and Kang (2024)	✓	×	×	✓	×	ILP	×	✓	×	✓	یادگیری ماشین	✓
Ocampo-Giraldo et al. (2024)	×	×	✓	✓	×	MILP	✓	×	✓	×	دقیق	×
Oakey et al. (2024)	✓	×	×	×	✓	ILP	✓	×	✓	×	ترکیبی	✓
Rostami et al. (2025)	✓	×	×	✓	×	MINLP	✓	×	✓	×	حل کننده دقیق	×
Ferone et al. (2025)	✓	×	×	✓	×	MILP	✓	×	✓	×	ترکیبی	×
Wolfinger et al. (2025)	×	×	✓	✓	×	×	×	✓	×	✓	ترکیبی	×

رویکرد مدل‌سازی

در شکل 7، روند به‌کارگیری انواع مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی در بازه زمانی 2013 تا 2025 نشان داده شده است. مدل‌های ریاضی مورد بررسی در این حوزه در چهار دسته کلی

فرموله شده‌اند: برنامه‌ریزی خطی عددصحیح[1]، برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط[2]، برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح[3] و برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط[4].

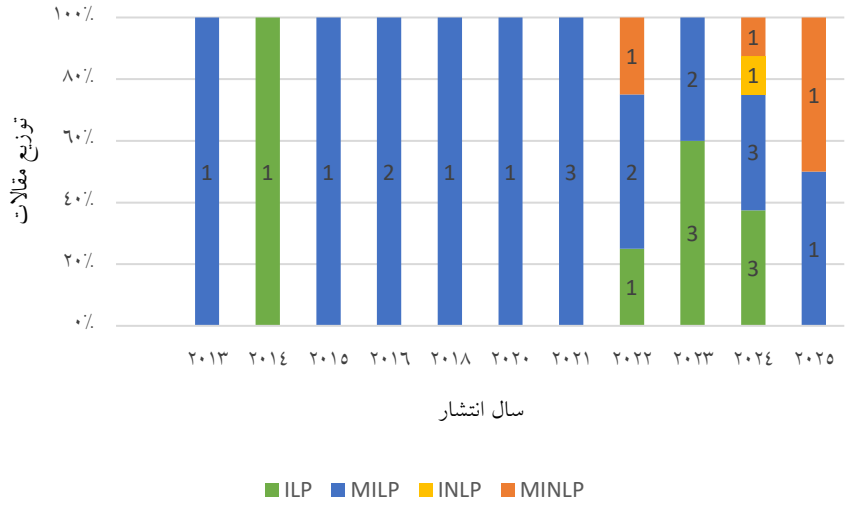
تا سال 2021، مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط به عنوان رویکرد غالب در مدل‌سازی مسائل حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی به کار گرفته شده است. اما از سال 2022 به بعد، تنوع قابل توجهی در نوع مدل‌های مورد استفاده مشاهده می‌شود. این تنوع احتمالاً ناشی از وجود روابط غیرخطی در توابع هدف و محدودیت‌های مدل‌ها و همچنین افزایش پیچیدگی ساختار آن‌هاست. در این بازه زمانی، حدود 59 درصد مقالات از رویکرد برنامه-ریزی عددصحیح مختلط بهره برده‌اند؛ دلیل اصلی این امر، ماهیت گسسته و پیوسته بودن متغیرهای تصمیم در مسائل مسیریابی و زمان‌بندی حمل‌ونقل است (برای مثال تصمیماتی مانند بازدید یا عدم بازدید از مشتری، زمان انجام بازدید، زمان رسیدن وسیله نقلیه به آزمایشگاه مرکزی و موارد مشابه). در مقابل، انواع مدل‌سازی غیرخطی که حل آن‌ها به مراتب دشوارتر است، سهم کمتری در مقالات مورد بررسی دارند و تنها حدود 14 درصد از مطالعات، از این نوع مدل‌سازی استفاده کرده‌اند.

سایر رویکردهای مدل‌سازی مانند برنامه‌ریزی تصادفی، برنامه‌ریزی فازی و برنامه‌ریزی استوار که برای مواجهه با عدم قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرند، به ندرت مورد توجه قرار گرفته‌اند. تنها یک مقاله (Wang et al., 2015) رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای را برای مدل‌سازی مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با تقاضای تصادفی اتخاذ کرده است. در این مطالعه، عدم قطعیت تقاضا از طریق مجموعه‌ای از سناریوها نشان داده شده است که برخی از تقاضاها فوری و دارای پنجره زمانی سخت هستند.

---

[1] Integer Linear Programming (ILP)
[2] Mixed-Integer Linear Programming (MILP)
[3] Integer Non-linear Programming (INLP)
[4] Mixed-Integer Non-linear Programming (MINLP)

شکل 7. تحلیل روند به‌کارگیری انواع مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی



علاوه‌براین، حدود 76 درصد از مطالعات مرتبط با حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی، مدل‌هایی از نوع مسئله مسیریابی وسیله نقلیه ارائه داده‌اند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به VRP چندسفره با پنجره‌های زمانی، VRP باز دارای ظرفیت و محدودیت زمانی، VRP با ورودی‌های غیرهمزمان، VRP چندسطحی با بارانداز متقاطع سراسری، VRP چنددوره‌ای پویا و چندمرحله‌ای، مسئله مسیریابی پهپاد ناهمگن دو سطحی با همگام‌سازی نقاط ترانزیت اشاره کرد. در مقابل، تنها دو مطالعه به مدل‌سازی مسئله فروشنده دوره‌گرد برای حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی پرداخته‌اند (Maji et al., 2023; Zhou et al., 2023). به‌طورکلی، بر اساس شواهد موجود، نوع مسئله حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی (به استثنای نمونه‌های کووید-19)، عمدتاً در دسته مسائل VRP قرار می‌گیرد.

Yücel و همکاران (2013a, 2013b) مسئله‌ای با عنوان «جمع‌آوری برای پردازش» را بررسی کرده‌اند که با مسائل کلاسیکی چون VRP و TSP متفاوت است؛ چرا که علاوه‌بر مسیریابی و تعیین توالی بازدیدها، زمان‌بندی بازدید از هر مکان نیز مشخص می‌شود. همچنین به دلیل وابستگی متقابل میان تورها، طراحی آن‌ها باید به‌طور همزمان انجام گیرد. از دیگر تفاوت‌های این مسئله با مسائل مشابه آن است که تصمیمات حمل‌ونقل بر زمان بیکاری پردازنده تأثیرگذارند و این موضوع به نوبه خود بر زمان تکمیل پردازش همه نمونه‌ها اثر

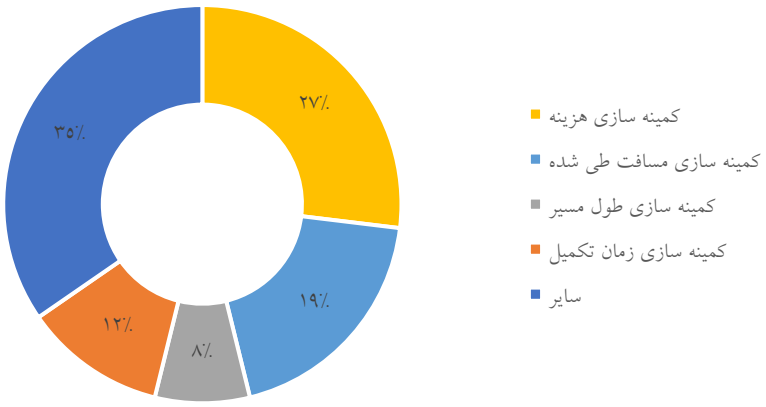
می‌گذارد. در پژوهشی دیگر، Tlili و همکاران (2022) مسئله جمع‌آوری و انتقال نمونه‌های کووید-19 را به صورت یک مسئله جهت‌یابی تیمی با مبدأ و مقصدهای چندگانه[1] مدل‌سازی کرده‌اند. تفاوت این مدل با TOP در آن است که ایستگاه نهایی دارای ظرفیت مشخصی است و آمبولانس‌ها از نقاط شروع متفاوت حرکت می‌کنند. هدف اصلی، یافتن مسیرهای بهینه برای آمبولانس‌ها به‌منظور بیشینه‌سازی امتیازهای ترياژ جمع‌آوری شده بیماران است، به‌گونه‌ای که محدودیت‌هایی مانند ظرفیت بیمارستان‌ها و حداکثر زمان مجاز هر مسیر نیز رعایت شود. Wolfinger و همکاران (2023) مسئله لجستیکی جدیدی تحت عنوان «مسئله آزمایش بیماری‌های مسری» معرفی کرده‌اند که در آن تصمیمات مسیریابی با تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص و زمان‌بندی ترکیب می‌شود. Wolfinger و همکاران (2025) نیز نسخه پویا و تصادفی این مسئله را ارائه کرده‌اند. علاوه‌براین، Ocampo-Giraldo و همکاران (2024) رویکردی متفاوت نسبت به مدل‌های رایج VRP برای مسئله حمل‌ونقل نمونه‌های زیست‌پزشکی پیشنهاد کرده‌اند. در این پژوهش، یک مدل ریاضی جدید برای مسئله طراحی شبکه خدمات مبتنی بر شبکه زمان‌گستر ارائه شده است که از نظر کارایی و بازتاب شرایط واقعی، عملکرد بهتری دارد.

در خصوص رویکرد مدل‌سازی، نوع و تعداد توابع هدف در مدل‌سازی مسئله مسیریابی برای حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی نیز بررسی شده است. شکل 8 درصد استفاده از توابع هدف مختلف را در مدل‌های تک‌هدفه مطالعات مورد بررسی نشان می‌دهد. حدود 75 درصد از مطالعات، از رویکرد بهینه‌سازی تک‌هدفه استفاده کرده‌اند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تابع هدف کمینه‌سازی هزینه بیشترین توجه را در این حوزه به خود اختصاص داده است. اجزای این تابع هدف در مدل‌ها متنوع بوده و شامل ترکیبی از هزینه سفر، هزینه ثابت، هزینه جریمه، هزینه برون‌سپاری حمل‌ونقل و هزینه افتتاح مراکز نمونه‌گیری است. کمینه‌سازی مسافت طی شده با سهم 19 درصد دومین تابع هدف با بیشترین فراوانی است. پس از آن کمینه‌سازی زمان تکمیل با سهم 12 درصد قرار می‌گیرد که به معنای اختلاف بین زمان دردسترس بودن نمونه برای جمع‌آوری و زمان رسیدن آن به آزمایشگاه مرکزی است. Fu and Kang (2024) این معیار را به عنوان «سن نمونه» تعریف کرده‌اند. همچنین، کمینه‌سازی طول مسیر در 8 درصد از مطالعات در نظر گرفته شده است؛ که علاوه بر زمان سفر، می‌تواند شامل زمان خدمت یا زمان انتظار نیز باشد. سایر توابع هدف

[1] Multi-Origin–Destination Team Orienteering Problem (MODTOP)

که تنها یک‌بار در مطالعات استفاده شده‌اند (35 درصد) شامل اهداف رایج مسئله مسیریابی مانند کمینه‌سازی زمان سفر، زمان تأخیر، تعداد وسایل نقلیه، و اهداف خاص مانند کمینه‌سازی میانگین زمان گردش نمونه‌ها در شبکه تشخیصی، یا زمان تکمیل پردازش نمونه‌ها هستند. Maji و همکاران (2023) نیز کمینه‌سازی زمان کل سیستم (شامل زمان سفر، زمان اضافی مانند ترافیک و عوارض، زمان توقف و بارگیری) و کمینه‌سازی زمان کریدور سبز[1] را در مدل‌های خود لحاظ کرده‌اند. کریدور سبز مسیری ویژه است که به گونه‌ای مدیریت می‌شود تا در آن، تمامی علائم راهنمایی و رانندگی بین دو نقطه خاص همواره سبز بوده و به صورت دستی کنترل شوند. به عبارت دیگر به دلیل نارضایتی عمومی از این سیستم حمل‌ونقل بدون توقف، هدف کمینه‌سازی این زمان است. در پژوهشی دیگر، Tlili و همکاران (2022) برای مدل‌سازی مسئله جهت‌یابی تیمی، بیشینه‌سازی امتیاز تریاژ جمع‌آوری شده را به عنوان تابع هدف مطرح کردند. در مرحله تریاژ به هر بیمار بر اساس علائم و شرایط سلامتی‌اش امتیازی اختصاص داده می‌شود. هدف مدل پیشنهادی آنان، یافتن برنامه تور یک روزه بهینه برای آمبولانس‌های موجود است تا امتیازات جمع‌آوری‌شده از بیماران حداکثر شود.

شکل 8. درصد استفاده از توابع هدف مختلف در مدل‌های تک‌هدفه



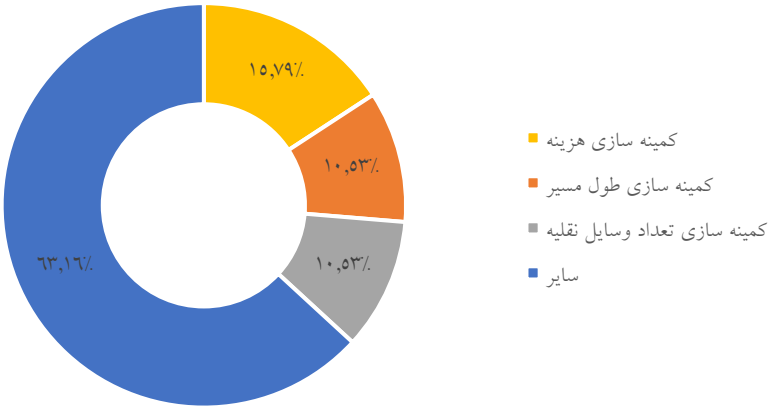
[1] Green Corridor

در شکل 9 نیز درصد استفاده از توابع هدف مختلف در مدل‌های چندهدفه نشان داده شده است. حدود 25 درصد از مطالعات، مدل‌های دو یا سه هدفه ارائه داده‌اند که هدف آن‌ها بهینه‌سازی چندهدفه به منظور یافتن یک مصالحه قابل قبول میان اهداف متناقض است. از میان این 8 مقاله، 5 مقاله دو هدفه و 3 مقاله چندهدفه بوده‌اند و از روش‌هایی مانند روش اهداف سلسله‌مراتبی، مجموع وزنی و اپسیلون- محدودیت برای تبدیل به مدل تک‌هدفه استفاده کرده‌اند. مشابه مدل‌های تک‌هدفه، کمینه‌سازی هزینه (15/79 درصد) بیشترین سهم را به عنوان یکی از توابع هدف مدل‌های چندهدفه دارد. کمینه‌سازی تعداد وسایل نقلیه و طول مسیر در رتبه بعدی قرار می‌گیرند. بخش قابل توجهی از توابع هدف (63/16 درصد) تنها یک‌بار استفاده شده‌اند و بعضی از آن‌ها برای نخستین بار توسط نویسندگان همان مطالعه معرفی شده‌اند. به عنوان نمونه، Kang & Fu (2024) شاخص «مواجهه[1]» را برای ارزیابی عملکرد همزمان پهپاد جمع‌آوری‌کننده و پهپاد تحویل‌دهنده و سنجش ایمنی نمونه‌های عفونی پیشنهاد کردند. این شاخص میزان نگهداری نمونه و همگام‌سازی در عملیات تحویل را اندازه‌گیری می‌کند. در جدول 4 سایر توابع هدف مورد استفاده ذکر شده است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که تحقیقات موجود عمدتاً بر کمینه‌سازی هزینه و زمان تحویل نمونه‌ها به آزمایشگاه مرکزی متمرکز بوده‌اند و اغلب به نوعی به دنبال کاهش زمان حمل-ونقل به منظور حفظ کیفیت و طول عمر نمونه‌ها بوده‌اند. در مسائل جمع‌آوری و انتقال نمونه‌های کووید-19، به دلیل حساسیت زمانی کمتر این نوع نمونه‌ها نسبت به سایر نمونه-های بیولوژیکی، اهدافی مانند کمینه‌سازی مسافت و هزینه و بیشینه‌سازی تعداد نمونه جمع-آوری شده و امتیاز تریاژ بیماران اولویت یافته‌اند؛ هرچند در مدل‌ها محدودیت‌های زمانی لحاظ شده‌اند. تنها یک پژوهش (Maji et al., 2023) برای انتقال نمونه‌ها در حداقل زمان ممکن و رعایت محدودیت «منفی کاذب» اولین نمونه جمع‌آوری شده، به‌طور خاص کمینه-سازی زمان کل سیستم را مدنظر قرار داده است. محدودیت «منفی کاذب» تضمین می‌کند که تمامی نمونه‌ها پیش از اتمام بازه زمانی بحرانی به مقصد برسند تا احتمال نتایج منفی کاذب کاهش یابد.

[1] Exposure

شکل 9. درصد استفاده از توابع هدف مختلف در مدل‌های چندهدفه



جدول 4. انواع توابع هدف در مدل‌های چندهدفه

نویسنده و سال	تابع هدف	نویسنده و سال	تابع هدف
Yücel et al. (2013a, 2013b)	بیشینه‌سازی تعداد نمونه‌های پردازش‌شده روزانه	Oakey et al. (2023)	کمینه‌سازی طولانی‌ترین مدت زمان یک دور جمع‌آوری (طولانی‌ترین مسیر)
Naji-Azimi et al. (2016)	کمینه‌سازی حداکثر تعداد جعبه‌های ورودی در شلوغ‌ترین بازه زمانی	Zhao et al. (2024)	کمینه‌سازی حداکثر زمان آزمایش
Smith et al. (2022)	کمینه‌سازی کل زمان سفر، کمینه‌سازی طولانی ترین زمان سفر وسیله نقلیه	Kang and Fu (2024)	کمینه‌سازی زمان کل جمع‌آوری نمونه، کمینه‌سازی شاخص مواجهه
Ozdemir et al. (2022)	بیشینه‌سازی تعداد نمونه جمع‌آوری شده، کمینه‌سازی حداکثر مسافت پیاده‌روی	Oakey et al. (2024)	کمینه‌سازی حداکثر زمان‌های ترانزیت، کمینه‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (انرژی/ اثرات زیست‌محیطی)

شکل 10 روند نوع مسئله (ایستا یا پویا و قطعی یا غیرقطعی) را در ادبیات مرتبط با مسئله حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، تا سال 2022، تمامی مطالعات انجام شده، مسئله را به صورت ایستا در نظر گرفته‌اند. سهم کلی مسائل ایستا در بازه زمانی 1972 تا 2025، برابر با 85 درصد است. در این میان، مسئله بررسی شده در دو پژوهش از نوع ایستا و غیرقطعی است (Elalouf et al., 2021; Wang et al., 2015) که در مدل بهینه‌سازی، پارامترهای غیرقطعی را لحاظ کرده‌اند. از سال 2023 به بعد، نشانه‌هایی از گذار به سمت مسائل پویا دیده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در سال 2024 سهم مطالعاتی که مسئله مسیریابی پویا را بررسی کرده‌اند، به 37/5 درصد رسیده است. در میان این مطالعات، تنها یک پژوهش به مدل‌سازی مسئله در حالت پویا و قطعی اختصاص یافته است، درحالی‌که چهار پژوهش دیگر نسخه پویا و غیرقطعی این مسئله را مورد بررسی قرار داده‌اند.

به عنوان مثال، Zhao و همکاران (2024) به منظور پاسخگویی بلادرنگ به محیط پویای در حال تغییر، یک مدل پویای چندانباره، چندسفره و دوره‌ای برای مسیریابی وسیله نقلیه ارائه دادند. مدل پیشنهادی آن‌ها دربرگیرنده سه زیرمسئله است: تعیین سفرهای چندگانه برای جمع‌آوری و انتقال نمونه‌ها، انتخاب آژانس تحویل، و بهینه‌سازی مسیر. تابع هدف مدل نیز کمینه‌سازی هزینه و زمان آزمایش با رعایت محدودیت‌هایی مانند تعداد و ظرفیت وسایل نقلیه و زمان تحویل است. Gibson و همکاران (2023) یک سیستم بهینه برای حمل‌ونقل نمونه‌های پزشکی طراحی کردند که تغییرپذیری تقاضا را در نظر می‌گیرد. این سیستم شامل دو جزء است: (1) یک رویکرد جدید برای جمع‌آوری به‌موقع اطلاعات تقاضای حمل‌ونقل (نمونه‌ها و نتایج) با استفاده از فناوری کم هزینه مبتنی بر تلفن همراه و (2) یک رویکرد حل مبتنی بر بهینه‌سازی برای زمان‌بندی و مسیریابی پویای سفرهای پیک در یک سیستم حمل‌ونقل چند مرحله‌ای. Heidari و همکاران (2024) یک سیستم پشتیبان تصمیم[1] برای برنامه‌ریزی اولیه و مجدد پویای مسیر حمل‌ونقل نمونه‌های پزشکی از آزمایشگاه‌های بالینی به آزمایشگاه مرکزی طراحی کردند که از عملیات بلادرنگ پشتیبانی می‌کند. سیستم پیشنهادی 4 جزء اصلی دارد: پیش‌بینی تقاضا با استفاده از شبکه عصبی، خوشه‌بندی مشتریان، مدل‌سازی ریاضی برای مسیریابی و زمان‌بندی و در نهایت، تعبیه استراتژی‌های تاب‌آوری در این چارچوب. همچنین، Fu and Kang (2024) برای مقابله با چالش ناشی از پویایی و عدم قطعیت در زمان ارسال درخواست کاربران، یک طرح جمع‌آوری نمونه پویا مبتنی بر

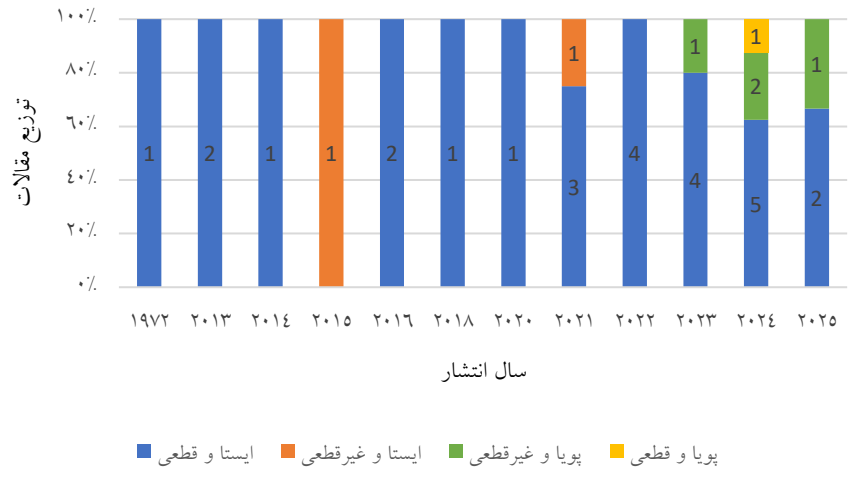
[1] Decision Support System (DSS)

یادگیری تقویتی عمیق پیشنهاد کردند. Wolfinger و همکاران (2025) نیز به نسخه تصادفی و پویا از مسئله آزمایش بیماری‌های مسری پرداختند که در آن تنها بخشی از موارد مشکوک از پیش مشخص‌اند، در حالی که برخی دیگر به صورت تصادفی در طول روز وارد سیستم می‌شوند.

در جدول 5، مؤلفه‌های پویایی و پارامترهای غیرقطعی که در این مطالعات در نظر گرفته شده‌اند، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درخواست آزمایشگاه‌ها و میزان تقاضای آن‌ها برای جمع‌آوری نمونه مهم‌ترین مؤلفه‌های پویایی و پارامترهای غیرقطعی محسوب می‌شوند که بیشترین توجه را در مدل‌سازی‌ها به خود اختصاص داده‌اند.

به‌طور کلی، آنچه سبب گذار از مسائل ایستا به مسائل پویا در حوزه حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی شده، دسترسی به داده‌های بلادرنگ و پیشرفت در روش‌های حل و شبیه‌سازی مسائل پویا است. زیرا با توجه به تغییرات پویای محیط شبکه شامل میزان تقاضای آزمایشگاه‌ها، تعداد آزمایشگاه‌های محلی متقاضی دریافت خدمت، زمان سفر، دردسترس بودن وسایل نقلیه، پنجره‌های زمانی غیرقطعی، و غیره، می‌توان نتیجه گرفت که مسئله مسیریابی برای جمع‌آوری و انتقال نمونه‌های بیولوژیکی، به‌طور ذاتی مسئله‌ای پویا به‌شمار می‌رود. به بیان دیگر، مواجه مؤثر با این تغییرات پویا نیازمند مدل‌سازی‌هایی واقع‌گرایانه شامل زمان‌بندی و مسیریابی بلادرنگ است.

شکل 10. تحلیل روند نوع مسئله از منظر ایستایی و پویایی



جدول 5. مؤلفه‌های پویایی و پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته شده در مطالعات مورد بررسی

نویسندگان و سال	ماهیت مسئله	مؤلفه‌های پویایی	پارامتر غیرقطعی
Wang et al. (2015)	ایستا و غیرقطعی	–	وقوع درخواست مشتری (تقاضای عادی و فوری)، زمان خدمت، پنجره زمانی بازدید از مشتری، دیرترین زمان ممکن برای تحویل درخواست مشتری به آزمایشگاه
Elalouf et al. (2021)	ایستا و غیرقطعی	–	نرخ ورود مشتریان به کلینیک
Gibson et al. (2023)	پویا و غیرقطعی	تقاضای جمع‌آوری نمونه	تقاضا (ورود نمونه‌های جدید به هر مرکز بهداشتی)
Zhao et al. (2024)	پویا و قطعی	تعداد نمونه‌ها، ظرفیت آزمایش و کارایی کارکنان	–
Heidari et al. (2024)	پویا و غیرقطعی	ظرفیت دردسترس وسایل نقلیه، رویدادهای غیرمنتظره (خرابی وسایل نقلیه، تصادفات رانندگی و تقاضای بسیار زیاد)	تعداد نمونه‌های جمع‌آوری شده توسط هر آزمایشگاه
Fu and Kang (2024)	پویا و غیرقطعی	زمان درخواست جمع‌آوری کاربران پویا	زمان درخواست جمع‌آوری کاربران پویا
Wolfinger et al. (2025)	پویا و غیرقطعی	ورود موارد جدید مشکوک به بیماری	ورود تصادفی موارد جدید مشکوک به بیماری

تکنیک‌های حل

شکل 11 روند تاریخی استفاده از تکنیک‌های مختلف حل مسئله مسیریابی را برای حمل-ونقل نمونه‌های بیولوژیکی در بازه زمانی 1973 تا 2025 نشان می‌دهد. همان‌طور که در

جدول قابل مشاهده است، این مسائل در مطالعات مختلف با الگوریتم‌های حل دقیق[1]، حل‌کننده دقیق[2]، ابتکاری[3]، فراابتکاری[4]، بهینه‌سازی تقریبی[5]، یادگیری ماشین[6] و الگوریتم‌های حل ترکیبی[7] حل شده‌اند. تحلیل این روند نشان می‌دهد که روش‌های حل مسئله در طول زمان، تحت تأثیر پیشرفت فناوری، افزایش پیچیدگی مسائل، و توسعه ابزارهای محاسباتی دستخوش تحولاتی شده‌اند. با توجه به شکل 5، در سال‌های ابتدایی الگوریتم‌های حل ابتکاری بیشترین کاربرد را داشتند. اما از سال 2014 به بعد، الگوریتم‌های حل فراابتکاری به‌تدریج به جایگاه برجسته‌ای در مطالعات رسیده‌اند و استفاده از آن‌ها به‌طور محسوسی افزایش یافته است. با توجه به ماهیت NP-hard بودن مسائل مسیریابی، الگوریتم‌های فراابتکاری به دلیل انعطاف‌پذیری و توانایی تولید جواب‌های نزدیک به بهینه در زمان معقول، گزینه‌های مطلوب‌تری به شمار می‌آیند. در مقابل، الگوریتم‌های حل دقیق و حل‌کننده‌های دقیق، تنها در سال‌های محدودی مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ که احتمالاً ناشی از هزینه محاسباتی بالا و کارایی پایین این الگوریتم‌ها در حل مسائل بزرگ‌مقیاس است. با این حال، برخی پژوهشگران با بهره‌گیری از الگوریتم‌های حل دقیق به نتایج قابل توجهی دست یافته‌اند. به عنوان مثال، Ocampo-Giraldo و همکاران (2024) الگوریتم دقیقی برای حل نمونه‌های بزرگ شبکه مراقبت‌های بهداشتی توسعه دادند که از روش کشف گسسته‌سازی پویا[8] بهره می‌برد. به گفته نویسندگان، این الگوریتم اولین روش دقیق برای حل مسئله حمل‌ونقل نمونه‌های زیست‌پزشکی است که به‌طور کارآمدی ملاحظات زمانی و تعداد بالای دوره‌ها و اقلام را مدیریت می‌کند.

از سال 2015 به بعد، الگوریتم‌های حل ترکیبی در برخی از پژوهش‌ها ظاهر شده و در سال‌های اخیر، حضور پررنگ‌تری یافته‌اند. استفاده همزمان از دو یا چند تکنیک، با هدف بهره‌گیری از مزایای نسبی هر یک، از جمله کیفیت بالای جواب در روش‌های دقیق و سرعت بالا در روش‌های تقریبی، می‌تواند به حل مؤثرتر مسائل پیچیده کمک کند. به عنوان نمونه،

---

[1] Exact Solution Algorithms
[2] Exact Solver
[3] Heuristics
[4] Metaheuristics
[5] Approximate Optimization
[6] Machine Learning
[7] Hybrid Solution Algorithms
[8] Dynamic Discretization Discovery (DDD)

رویکردهای ریاضی‌ابتکاری[1] که کاربرد آن‌ها در برخی از مطالعات دیده می‌شود (مانند Ferone et al., 2025; Mazzanti et al., 2024; Ozdemir et al., 2022) تعادلی میان کیفیت برنامه‌ریزی ریاضی و کارایی روش‌های فراابتکاری و ابتکاری برقرار می‌کنند. با توجه به طول عمر کوتاه نمونه‌های بیولوژیکی، انتقال سریع آن‌ها یک مسئله لجستیکی چالش‌برانگیز محسوب می‌شود. در این شرایط، استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی که قادرند در مدت زمان کوتاه جواب‌هایی با کیفیت بالا ارائه دهند، رویکردی منطقی و کارآمد است. همچنین، الگوریتم‌های ابتکاری به منظور بهبود کیفیت جواب، فرار از بهینه‌های محلی و گسترش فضای جستجو اغلب با سایرروش‌ها مانند الگوریتم‌های حل دقیق و فراابتکاری به صورت ترکیبی به کار رفته‌اند.

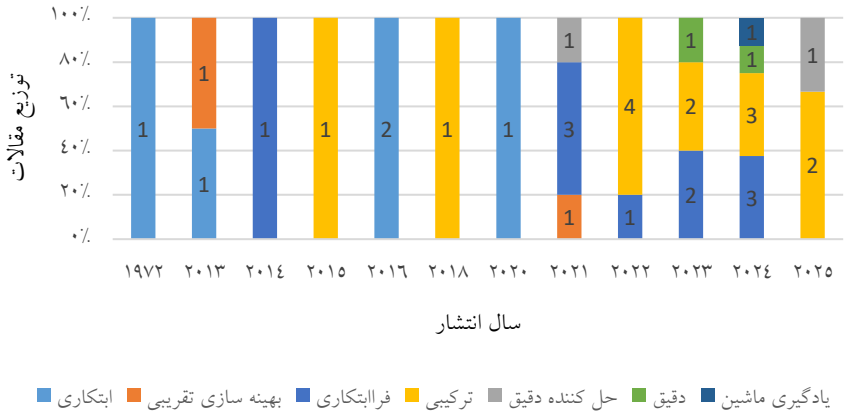
در سال‌های اخیر، به‌ویژه در سال 2024، الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیز به منظور تنظیم پارامترهای مدل و یا به عنوان رویکرد حل مدل وارد حوزه بهینه‌سازی شده‌اند و استفاده از آن‌ها برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده و بزرگ‌مقیاس در حال رشد و گسترش است. به عنوان مثال، Fu and Kang (2024) یک سیستم جمع‌آوری نمونه‌های عفونی را طراحی کرده‌اند که در محیط اینترنت اشیاء و با استفاده از پهپادهای ناهمگن عمل می‌کند. این پژوهشگران، به دلیل پویایی و عدم قطعیت زمان درخواست کاربران یک طرح جمع‌آوری نمونه پویا مبتنی بر یادگیری تقویتی عمیق[2] پیشنهاد کرده‌اند. در این طرح، ابتدا کاربران به زیرمنطقه‌هایی مجزا تقسیم شده و سپس الگوریتم یادگیری تقویتی عمیق برای مسیریابی سریع و پویای پهپادها پیاده‌سازی شده است. طرح پیشنهادی آن‌ها می‌تواند به‌موقع به درخواست‌های جدید برای جمع‌آوری نمونه‌های عفونی پاسخ دهد.

شکل 12، درصد استفاده از رویکردهای مختلف حل را برای درک بهتر سهم هر یک نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، بیشترین سهم به الگوریتم‌های حل ترکیبی (37/14 درصد) و الگوریتم‌های فراابتکاری (28/57 درصد) تعلق دارد و در حال حاضر، این دو رویکرد بیشترین توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. پس از آن، الگوریتم‌های ابتکاری (14/29 درصد)، الگوریتم‌های حل دقیق، حل‌کننده‌های دقیق و بهینه‌سازی تقریبی (5/71 درصد) در رده بعدی قرار دارند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیز با سهم 2/86

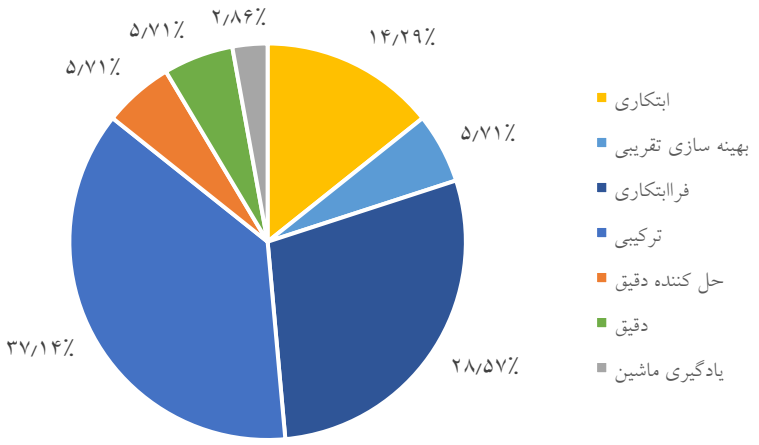
[1] Matheuristic
[2] Deep Reinforcement Learning

درصد، حضور محدودی دارند که احتمالاً ناشی از نوظهور بودن و مراحل اولیه رشد آن‌ها در این حوزه است.

شکل 11. تحلیل روند تکنیک حل



شکل 12. درصد استفاده از تکنیک‌های مختلف حل در ادبیات



کاربرد فناوری‌های نوآورانه

از اهداف دیگر پژوهش حاضر، بررسی کاربرد فناوری‌های نوآورانه‌ای است که در حوزه جمع‌آوری و انتقال نمونه‌های بیولوژیکی به‌کار گرفته شده‌اند. این فناوری‌ها، راهکارهای نوین و پیشرفته‌ای برای بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل نمونه‌ها، افزایش کارایی عملیات و ارتقای کیفیت نتایج آزمایش‌های بالینی فراهم می‌کنند. جدول 6 خلاصه‌ای از انواع این فناوری‌ها و پژوهشگرانی که در مطالعات خود از آن‌ها بهره گرفته‌اند، ارائه می‌دهد.

یکی از برجسته‌ترین این فناوری‌ها، وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین[1] (پهپادها[2]) هستند که پتانسیل قابل‌توجهی در بهبود شاخص‌های عملکردی شبکه لجستیک و زنجیره تأمین مراقبت‌های بهداشتی دارند. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به کاهش هزینه، افزایش قابلیت اطمینان، بهبود پاسخ‌گویی، ارتقاء چابکی و مدیریت مؤثر منابع اشاره کرد. پهپادها به عنوان وسیله‌ای ایمن و سریع می‌توانند در انتقال نمونه‌های میکروبیولوژیکی و آزمایشگاهی، داروها، واکسن‌ها، تجهیزات پزشکی اورژانسی و حتی بیماران مورد استفاده قرار گیرند. کاربرد پهپادها در حمل و نقل نمونه‌های بیولوژیکی مزایایی نظیر حذف تأخیرهای ناشی از ترافیک، کاهش هزینه‌های سربار و امکان دسترسی به مناطق فاقد زیرساخت جاده‌ای مناسب را به همراه دارد (Ozkan & Atli, 2021). Ozkan and Atli (2021) به منظور افزایش سرعت پاسخدهی آزمایش‌های PCR[3] در دوران شیوع کووید-19، یک مدل ریاضی برای مسئله مسیریابی پهپادهای دارای ظرفیت برد و بار طراحی کردند. Oakey و همکاران (2024) مسئله جمع‌آوری پایدار نمونه‌های پزشکی را توسعه دادند که در آن نمونه‌های پزشکی توسط ون، دوچرخه و پهپاد از مطب‌ها و مراکز درمانی محلی به آزمایشگاه مرکزی بیمارستان منتقل می‌شوند. این فرآیند در قالب یک ساختار دوسطحی طراحی شده و با در نظر گرفتن محدودیت‌های زمانی، به صورت یک مدل چندهدفه وزنی برای کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی، زمان انتقال و اثرات انرژی و زیست‌محیطی فرموله شده است.

از دیگر فناوری‌های نوین در این حوزه، ترکیب پهپادها با اینترنت اشیاء[4] است که می‌تواند راهکارهای کارآمدی برای جمع‌آوری نمونه‌های عفونی ارائه دهد. پهپادهای مجهز به حسگرهای متنوع قادرند نمونه‌ها را به صورت خودکار جمع‌آوری کنند. این امر ضمن

[1] Uncrewed Aerial Vehicles (UAV)
[2] Drone
[3] Polymerase Chain Reaction
[4] Internet of Things (IoT)

افزایش کارایی، موجب کاهش خطر انتقال ویروس نیز به دلیل دخالت کمتر انسان می‌شود. ویژگی هوشمندی و چابکی پهپادها در بستر IoT باعث می‌شود کاربران بتوانند درخواست‌های خود را به صورت بلادرنگ ارسال کنند. در چنین شرایطی، دریافت مداوم درخواست‌های جدید در حین عملیات حمل‌ونقل، زمان‌بندی و مسیریابی ایستا را ناکارآمد می‌سازد. بنابراین، توسعه راهبردهای جمع‌آوری پویا و سازگار با تغییرات محیطی، در هنگام ساخت سیستم‌های جمع‌آوری نمونه عفونی امری ضروری است.

Fu and Kang (2024) با طراحی یک سیستم هوشمند و ایمن مبتنی بر پهپادهای ناهمگن در محیط اینترنت اشیاء، به این نیاز پاسخ دادند. این سیستم از دو بخش اصلی تشکیل شده است: فرآیند ارتباطات و فرآیند جمع‌آوری. در بخش ارتباطات، مرکز آزمایش از طریق فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیاء (مانند 4/5G و سامانه‌های شناسایی با امواج رادیویی [1]) تلفن‌های هوشمند و سیستم‌های موقعیت‌یابی اطلاعات مورد نیاز را از کاربران و پهپادها دریافت می‌کند. این اطلاعات شامل (1) داده‌های مربوط به درخواست کاربران برای جمع‌آوری نمونه‌های عفونی و هویت آن‌ها، (2) اطلاعات مربوط به وضعیت جمع‌آوری پهپادها (موقعیت، سرعت، انرژی، خطاها، مسیرها و زمان رسیدن پهپاد)، و (3) شرایط محیطی حمل‌ونقل (دما، رطوبت و لرزش ثبت شده توسط حسگرها) است. این اطلاعات به صورت بلادرنگ به مرکز آزمایش ارسال شده و پس از تحلیل، در تخصیص بهینه منابع و برنامه‌ریزی پویای مسیرها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در پژوهشی دیگر، Kang and Fu (2024) با هدف بهبود ایمنی و جمع‌آوری به‌موقع نمونه‌های عفونی، سه فناوری نوظهور شامل اینترنت اشیاء، بلاکچین [2] و پهپاد را با یکدیگر ادغام کردند. آن‌ها یک سیستم سه لایه متشکل از لایه زیرساخت، لایه بلاکچین و لایه کاربردی ارائه دادند که در این سیستم، داده‌های مربوط به نمونه‌ها و نتایج آزمایش به صورت ایمن در بستر بلاکچین ذخیره می‌شوند. این فناوری نه تنها امنیت و یکپارچگی اطلاعات را تضمین می‌کند، بلکه قابلیت ردیابی منشأ و روند تغییرات نمونه‌ها را نیز فراهم ساخته و تصمیم‌گیری‌های معتبر در مدیریت بهداشت عمومی تسهیل می‌کند. این ویژگی در تضمین اصالت نمونه‌ها، حفظ ایمنی زیستی و مقابله با شیوع بیماری‌های واگیردار نقش بسزایی دارد.

---

[1] Radio Frequency Identification (RFID)
[2] Blockchain

هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیز در این حوزه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه، Heidari و همکاران (2024) با استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه، به پیش‌بینی تغییرات پویای تقاضا برای آزمایش‌های بالینی پرداختند. آن‌ها همچنین با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی، آزمایشگاه‌ها را بر اساس توزیع جغرافیایی و سطح تقاضا گروه‌بندی کردند تا به مسیریابی و تخصیص مؤثر منابع کمک کنند. افزون بر این، Fu and Kang (2024) الگوریتم یادگیری تقویتی عمیق را برای مسیریابی سریع و پویای پهپادها به کار گرفتند. سیستم موقعیت‌یابی جهانی[1] نیز در مطالعاتی چون Fu and Kang (2024)، Kang and Fu (2024)، Heidari و همکاران (2024) برای ردیابی وسایل نقلیه و نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

در مجموع، کاربرد و تلفیق فناوری‌هایی چون پهپاد، اینترنت اشیاء، بلاکچین، سیستم موقعیت‌یابی جهانی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، ظرفیت قابل‌توجهی در بهبود فرآیندهای جمع‌آوری، انتقال و مدیریت داده‌های نمونه‌های پزشکی و پویایی و واکنش‌پذیری سیستم‌های حمل‌ونقل دارند و این می‌تواند زیرساختی مؤثر برای پاسخگویی سریع و هوشمندانه به بحران‌های بهداشتی آتی باشد.

جدول 6. فناوری‌های به‌کاررفته در مطالعات مورد بررسی

نوع فناوری	کاربرد فناوری	نویسندگان و سال
اینترنت اشیاء	دریافت اطلاعات به صورت بلادرنگ	Fu and Kang (2024), Kang and Fu (2024)
بلاکچین	ذخیره‌سازی ایمن داده‌های مربوط به نمونه‌ها و نتایج آزمایش، فراهم نمودن قابلیت ردیابی منشأ و روند تغییرات نمونه‌ها	Kang and Fu (2024)
وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین پرنده هدایت‌پذیر از دور (پهپاد)	انتقال ایمن و سریع نمونه عفونی	Fu and Kang (2024), Kang and Fu (2024), Oakey et al. (2024), Ozkan & Atli (2021)
یادگیری ماشین	مسیریابی سریع و پویای پهپاد	Fu & Kang (2024)

[1] Global Positioning System (GPS)

	پیش‌بینی تغییرات پویای تقاضا برای آزمایش‌های بالینی، خوشه‌بندی آزمایشگاه‌ها	Heidari et al. (2024)
سیستم موقعیت‌یابی جهانی	ردیابی وسایل نقلیه و نمونه‌ها	Fu and Kang (2024), Heidari et al. (2024), Kang and Fu (2024)

بحث و فرصت‌های پژوهشی آینده

به دلیل عدم دسترسی بلادرنگ به اطلاعات در سیستم‌های سنتی حمل‌ونقل نمونه، مسیرهای حمل‌ونقل اغلب ثابت و به صورت هفتگی یا ماهانه تعریف می‌شوند. این در حالی است که با توجه به ماهیت پویای مسئله حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی، تخصیص منابع به صورت پویا و انعطاف‌پذیر برای انطباق با تغییرات پارامترهای مدل امری ضروری است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که تنها تعداد محدودی از مطالعات (15 درصد) مؤلفه‌های پویایی را در مدل‌سازی خود لحاظ کرده‌اند. رایج‌ترین مؤلفه پویایی، درخواست آزمایشگاه‌ها و میزان تقاضای آن‌ها بوده است؛ در حالی که سایر عوامل پویا مانند زمان سفر، زمان خدمت‌رسانی، دردسترس بودن وسایل نقلیه، ورود درخواست‌های جدید و وضعیت ترافیک اغلب نادیده گرفته شده‌اند. از این‌رو، پژوهش‌های آینده باید بر مدل‌سازی پویا در حوزه حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی تمرکز بیشتری داشته باشند.

از سوی دیگر، مسئله مسیریابی برای حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی در دنیای واقعی با عدم قطعیت‌های متعددی مواجه است. عواملی مانند زمان سفر، زمان خدمت‌رسانی، پنجره‌های زمانی، میزان تقاضا، ظرفیت آزمایشگاه‌ها و هزینه‌های حمل‌ونقل تحت تأثیر شرایط بیرونی نظیر وضعیت ترافیک، تغییرات آب و هوایی، هزینه‌های اقتصادی و سطح رفاه جامعه قرار دارند. نادیده گرفتن این عدم قطعیت‌ها می‌تواند منجر به جواب‌های غیرواقعی یا غیربهینه شود. بر این اساس، متناسب با نوع عدم قطعیت (تصادفی، شناختی یا عمیق)، می‌توان از رویکردهای رایج همچون برنامه‌ریزی تصادفی، برنامه‌ریزی امکانی، برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر و برنامه‌ریزی استوار بهره گرفت. بررسی ادبیات نشان می‌دهد که تنها یک مطالعه (Wang et al., 2015) از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای استفاده کرده و عدم قطعیت تقاضا را از طریق مجموعه‌ای از سناریوها نشان داده است. با توجه به ماهیت غیرقطعی تقاضا برای جمع‌آوری نمونه، به‌ویژه در شرایط بحرانی مانند اپیدمی‌ها، استفاده از رویکردهای

ترکیبی مانند رویکرد فازی مبتنی بر سناریو، واقع‌بینانه‌تر است. در چنین حالتی، به جای برآورد قطعی تقاضا در هر سناریو، یک عدد فازی به عنوان پارامتر تقاضا در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر آن، در شرایطی که داده‌های تاریخی کافی برای تخمین توزیع احتمالات وجود ندارد، بهینه‌سازی استوار یا بهینه‌سازی امکانی استوار توصیه می‌شود. از سوی دیگر، هیچ یک از مطالعاتی که پنجره‌های زمانی آزمایشگاه‌ها را در مدل‌سازی خود مد نظر قرار داده‌اند، از برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر برای مدیریت عدم قطعیت استفاده نکرده‌اند. بنابراین، برای اعمال محدودیت پنجره زمانی نرم که امکان تخطی کنترل شده از آن وجود دارد، بهره‌گیری از برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر می‌تواند رویکرد مناسبی باشد.

یکی از محورهای کلیدی در حوزه مسائل پویا، تصمیم‌گیری بلادرنگ در زمان‌بندی و مسیریابی برای حمل‌ونقل نمونه‌ها است. این رویکرد شاخه‌ای از تصمیم‌گیری در فضای قطعی است که با اتکا به زیرساخت‌های دیجیتال امکان به‌روزرسانی داده‌ها و تعیین مسیرهای جدید را درلحظه فراهم می‌کند. درمسیریابی مبتنی بر تصمیم‌گیری بلادرنگ، تغییرات مداوم داده‌ها سبب بازتنظیم چندباره مسیرها در طول روز می‌شود، در حالی که در رویکردهای سنتی مسیرها تنها در ابتدای روز برنامه‌ریزی شده و تا پایان دوره خدمت‌دهی ثابت باقی می‌مانند. در این راستا، توسعه سیستم‌های پشتیبان تصمیم برای بهینه‌سازی مسیریابی بلادرنگ اهمیت ویژه‌ای دارد. چنین سیستمی مستلزم وجود زیرساخت‌های دیجیتال و دسترسی به داده‌های برخط[1] است تا با دریافت آنی ورودی‌ها و پردازش سریع آن‌ها، توالی بازدید و زمان‌بندی جمع‌آوری نمونه‌ها از آزمایشگاه‌ها را تعیین کند. برای مثال، Heidari و همکاران (2024) یک سیستم پشتیبان تصمیم برای مدیریت عملیات بلادرنگ ارائه کرده‌اند که در آن تمرکز بر پیش‌بینی تقاضا با استفاده از شبکه‌های عصبی بوده است. این در حالی است که در چنین سیستمی می‌توان به جای تکیه بر پیش‌بینی، دریافت داده‌های بلادرنگ مانند نوع نمونه، مکان جمع‌آوری و زمان آماده بودن آن برای برداشت را از طریق نرم‌افزارهای کاربردی یا پورتال‌های برخط مراکز آزمایشگاهی مد نظر قرار داد. افزون بر این، استفاده از فناوری‌های نوین همچون اینترنت اشیاء و RFID می‌تواند کارایی این سیستم‌ها را ارتقا دهد. به عنوان نمونه، محفظه‌های نگهداری نمونه‌های بیولوژیکی که به حسگرهای ظرفیت مجهز هستند، پس از رسیدن به آستانه مشخص، به‌طور خودکار سیگنال درخواست جمع‌آوری به آزمایشگاه مرکزی ارسال می‌کنند. همچنین، عبور کیت‌های نمونه‌گیری دارای برچسب

[1] Online

RFID از دستگاه‌های اسکن می‌تواند داده‌های مربوط به تقاضاهای جدید را به سیستم منتقل کند.

از منظر مدل‌سازی، اغلب پژوهش‌ها مسئله حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی را در قالب VRP فرموله کرده‌اند. دلیل این انتخاب، سازگاری بالای VRP با شرایط واقعی حمل‌ونقل نمونه‌ها و امکان لحاظ محدودیت‌های متنوع است. با این حال، نکته‌ای اساسی که در مدل‌سازی این مسئله باید مورد توجه قرار گیرد، فسادپذیری نمونه‌های بیولوژیکی است. به این معنا که طول عمر هر نمونه از لحظه نمونه‌برداری تا لحظه تحویل در آزمایشگاه مرکزی باید به عنوان محدودیتی متفاوت از محدودیت‌های کلاسیک زمان سفر در مدل لحاظ شود. در بسیاری از مطالعات، فرض ساده‌سازی مدل مبنی بر شروع فرآیند فساد از زمان آغاز حمل‌ونقل در نظر گرفته شده است. حذف این فرض و لحاظ محدودیت واقع‌گرایانه‌تر می‌تواند موجب همگرایی بیشتر مدل با شرایط عملیاتی دنیای واقعی شود. همچنین، بررسی‌ها نشان داد که تنها حدود 25 درصد از مطالعات به بهینه‌سازی چندهدفه پرداخته‌اند. توجه بیشتر به این رویکرد و تلاش برای ایجاد سازش میان اهداف متناقض می‌تواند کارایی مدل‌ها را در مسائل واقعی افزایش دهد. برای مثال، کمینه‌سازی همزمان هزینه و زمان تکمیل که تا کنون مد نظر قرار نگرفته می‌تواند توازنی میان این دو معیار کلیدی ایجاد نماید.

مطابق شکل 11، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای مسیریابی بهینه هنوز در مراحل اولیه قرار دارد. پژوهش‌های آینده می‌توانند به بررسی کاربرد و کارایی این الگوریتم‌ها در حل مسائل بزرگ‌مقیاس توجه ویژه‌ای داشته باشند. همچنین پیشنهاد می‌شود برای نمونه‌های بزرگ مسائل مسیریابی، روش‌های دقیق مانند کشف گسسته‌سازی پویا (Ocampo-Giraldo et al., 2024) جهت دستیابی سریع به جواب‌های با کیفیت توسعه یابند. همان‌طور که ذکر شد، با توجه به ماهیت فاسدشدنی نمونه‌های بیولوژیکی، تصمیم‌گیری بلادرنگ برای زمان‌بندی و مسیریابی انتقال آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. از این‌رو، زمان محاسباتی روش‌های حل مدل‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری بلادرنگ یک جنبه حیاتی محسوب می‌شود. بهره‌گیری از یک روش یا ترکیبی از روش‌ها که بتواند در زمان معقول به جواب‌های با کیفیت دست یابد، باید در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد. یکی از رویکردهای پیشنهادی، تقسیم مسئله به چند زیرمسئله از طریق خوشه‌بندی مراکز آزمایشگاهی و تعیین مسیرهای بهینه برای هر خوشه است. این رویکرد می‌تواند برای مسیریابی بلادرنگ مفید

باشد، زیرا با کاهش ابعاد مسئله، زمان حل و پیچیدگی محاسباتی کاهش می‌یابد و امکان واکنش سریع به تغییرات پارامترها فراهم می‌شود. برای مثال، زمانی که تقاضای آزمایشگاهی تغییر می‌کند، تنها مسیرهای خوشه مرتبط به‌روزرسانی می‌شوند. استفاده از خوشه‌بندی و سپس مسیریابی برای خوشه‌ها، در برخی مطالعات (مانند Ferone et al., 2025; Heidari et al., 2024) مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی تنها به یک الگوریتم خوشه‌بندی بسنده نکنند، بلکه با مقایسه چندین الگوریتم از نظر کیفیت خوشه‌بندی و کارایی محاسباتی، مناسب‌ترین گزینه را برای مسئله موردنظر انتخاب کنند.

به‌کارگیری فناوری‌های نوآورانه‌ای همچون پهپاد، اینترنت اشیاء، بلاکچین، هوش مصنوعی و سیستم موقعیت‌یابی جهانی در حوزه حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی تاکنون محدود بوده است (جدول 6). این فناوری‌ها عمدتاً در مطالعات مرتبط با حمل‌ونقل نمونه‌های عفونی، به‌ویژه نمونه‌های کووید-19 در شرایط اپیدمی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. در سیستم‌های سنتی، افزایش تقاضا می‌تواند منجر به بروز خطاهای انسانی مانند برچسب‌گذاری اشتباه نمونه‌ها، مفقود شدن یا تحویل نادرست نمونه‌ها شود. از سوی دیگر، نمونه‌ها در جعبه‌هایی با دمای و رطوبت کنترل شده حمل می‌شوند. در این راستا، آزمایشگاه‌های مرکزی می‌توانند از فناوری‌هایی مانند GPS و اینترنت اشیاء برای ردیابی وسایل نقلیه و نمونه‌ها و نیز پایش دما و رطوبت جعبه‌ها بهره گیرند. همچنین، فناوری بلاکچین قابلیت ذخیره‌سازی امن و یکپارچه داده‌های مرتبط با نمونه‌ها و نتایج آزمایش را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند در پیش‌بینی پارامترهای غیرقطعی مدل‌های مسیریابی یا تعیین مسیرهای بهینه مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، پهپادها به عنوان ابزاری نوآورانه قابلیت انتقال سریع و ایمن نمونه‌ها در مناطق پرترافیک، مناطق دورافتاده و نیز در شرایط بحرانی که با محدودیت‌های شدید دسترسی همراه هستند، دارند. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود که به‌کارگیری این فناوری‌های نوآورانه نه تنها در شرایط اپیدمی، بلکه در فرآیند حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی در شرایط عادی نیز مورد توجه قرار گیرد.

با وجود اهمیت روزافزون تحلیل کلان‌داده‌ها، این موضوع در هیچ یک از مطالعات بررسی شده به‌طور مستقیم مورد توجه قرار نگرفته است. در یک سیستم پشتیبان تصمیم بلادرنگ، داده‌های متنوعی مانند اطلاعات ترافیکی، شرایط آب‌وهوایی و وضعیت جاده‌ها به حجم انبوه تولید می‌شوند. این داده‌ها، به همراه داده‌های تقاضا که از طریق نرم‌افزارهای

کاربردی یا اینترنت اشیاء جمع‌آوری می‌شوند، می‌توانند به صورت همزمان پردازش شده و مسیرهای بهینه تعیین گردند. علاوه بر این، داده‌های تولید شده توسط حسگرهای مختلف (مانند دما و رطوبت جعبه‌های حمل نمونه) می‌توانند تحلیل شوند تا انحراف‌های احتمالی از مقادیر استاندارد شناسایی شود و کیفیت نمونه‌ها در طول فرآیند حمل تضمین شود. در شرایط بحرانی نظیر اپیدمی‌ها، تحلیل کلان‌داده‌ها در ترکیب با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، علاوه بر تصمیمات واکنشی و بلادرنگ، امکان پیش‌بینی روند گسترش بیماری و شناسایی مناطق یا مراکزی که بیشترین تقاضا برای جمع‌آوری نمونه را دارند فراهم می‌آورد. به عنوان نمونه، Kang and Fu (2024) فناوری بلاکچین را برای ذخیره‌سازی ایمن داده‌های نمونه‌های عفونی و ثبت منشأ و تغییرات آن‌ها به کار گرفته‌اند. هرچند این مطالعه به تحلیل کلان‌داده‌ها نپرداخته است، داده‌های امن و قابل ردیابی ذخیره شده در بلاکچین می‌توانند مبنایی ارزشمند برای تحلیل روند شیوع بیماری فراهم آورند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مرور نظام‌مند ادبیات مرتبط با حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی در شبکه آزمایشگاهی در سه مرحله انجام شد. پس از بازیابی و غربالگری مقالات، تعداد 33 مقاله برای تحلیل انتخاب شدند. روند رو به رشد انتشار مقالات طی سال‌های اخیر بیانگر اهمیت روزافزون این موضوع به عنوان یک مسئله لجستیکی حساس و پیچیده است. با وجود این روند افزایشی، تاکنون مطالعه‌ای مروری که تصویری جامع از پژوهش‌های پیشین ارائه دهد گزارش نشده است. از منظر نوآوری نظری، این پژوهش تلاش کرده است که با تمرکز بر رویکردهای مدل‌سازی، تکنیک‌های حل و فناوری‌های مورد استفاده، تصویری جامع و به‌روز از وضعیت موجود این حوزه ترسیم کند.

یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که بخش عمده‌ای از مطالعات بر VRP متمرکز بوده‌اند و اغلب مدل‌ها به دلیل ماهیت متغیرهای تصمیم مسائل مسیریابی به صورت برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط فرموله شده‌اند. از منظر تکنیک‌های حل، گذار تدریجی از الگوریتم‌های ابتکاری به سمت الگوریتم‌های ترکیبی بیانگر نیاز به روش‌هایی است که بتوانند به‌طور همزمان کیفیت جواب و کارایی محاسباتی را بهبود دهند. افزون بر این، به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین طی سال‌های اخیر ظرفیت‌های نوینی برای حل مسائل بزرگ‌مقیاس فراهم کرده است. طبقه‌بندی مقالات نشان داد که اغلب پژوهش‌ها مسئله را به صورت

ایستا و قطعی مدل‌سازی کرده‌اند؛ در حالی که ماهیت واقعی مسئله حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی پویا و متأثر از عدم قطعیت است. شواهد بیانگر آن است که از سال 2023 به بعد، حرکت به سمت مدل‌سازی مسائل پویا افزایش یافته است. علاوه بر این، تعداد محدودی از مطالعات به بررسی کاربرد فناوری‌های نوین، از جمله پهپاد، اینترنت اشیاء، بلاکچین، GPS و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، در ارتقای سرعت، ایمنی، ردیابی و بهینه‌سازی مسیر حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی پرداخته‌اند.

به‌طور کلی، حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی یک مسئله لجستیکی چالش‌برانگیز است. با توجه به طول عمر محدود نمونه‌ها و ضرورت رعایت الزامات حمل‌ونقل از نظر زمان، دما و شرایط فیزیکی نمونه‌ها، ضروری است که آزمایشگاه‌ها برنامه‌ریزی مسیر و زمان‌بندی دقیقی با بهره‌گیری از تکنیک‌های نوین تحقیق در عملیات، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و فناوری‌های نوآورانه انجام دهند تا نمونه‌ها در زمان مناسب و با حفظ کیفیت منتقل شوند. در این پژوهش، مرور نظام‌مند ادبیات نشان داد که هنوز شکاف‌های پژوهشی قابل توجهی در این حوزه وجود دارد که می‌تواند محور تحقیقات آینده قرار گیرد.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی ندارند.

ORCID

Asma Bakhtiari Tavana https://orcid.org/0000-0003-2682-9215

Maghsoud Amiri https://orcid.org/0000-0002-0650-2584

Amir Yousefli https://orcid.org/0000-0003-3250-2403

Mohammad Taghi Taghavifard https://orcid.org/0000-0002-4212-2079

References

Anaya-Arenas, A. M., Chabot, T., Renaud, J., & Ruiz, A. (2016). Biomedical sample transportation in the province of Quebec: A case study. *International Journal of Production Research*, *54*(2), 602–615. https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1018455

Anaya-Arenas, A. M., Prodhon, C., Renaud, J., & Ruiz, A. (2021). An iterated local search for the biomedical sample transportation problem with multiple and interdependent pickups. *Journal of the Operational Research Society*, *72*(2), 367–382. https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1657369

Asghari, M., & Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J. (2021). Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. *International Journal of Production Economics*, *231*, 107899. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107899

Awad, M., Ndiaye, M., & Osman, A. (2021). Vehicle routing in cold food supply chain logistics: A literature review. *The International Journal of Logistics Management*, *32*(2), 592–617. https://doi.org/10.1108/IJLM-02-2020-0092

Benini, M., Detti, P., & Zabalo Manrique De Lara, G. (2022). Mathematical programming formulations and metaheuristics for biological sample transportation problems in healthcare. *Computers & Operations Research*, *146*, 105921. https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105921

Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, *99*, 300–313. https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007

Cheikhrouhou, O., & Khoufi, I. (2021). A comprehensive survey on the Multiple Traveling Salesman Problem: Applications, approaches and taxonomy. *Computer Science Review*, *40*, 100369. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100369

Elalouf, A., Tsadikovich, D., & Hovav, S. (2018). Optimization of blood sample collection with timing and quality constraints. *International Transactions in Operational Research*, *25*(1), 191–214. https://doi.org/10.1111/itor.12354

Elalouf, A., Tsadikovich, D., & Hovav, S. (2021). A simulation-based approach for improving the clinical blood sample supply chain. *Health Care Management Science*, *24*(1), 216–233. https://doi.org/10.1007/s10729-020-09534-0

Ferone, D., Festa, P., Fugaro, S., & Pastore, T. (2025). Hybridizing a matheuristic with ALNS for the optimal collection and delivery of medical specimens. *International Transactions in Operational Research*, *32*(1), 90–116. https://doi.org/10.1111/itor.13386

Fu, X., & Kang, S. (2024). Reinforcement learning-based drone-assisted collection system for infection samples in IoT environment. *Internet of Things*, *28*, 101407. https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101407

Gibson, E., Deo, S., Jónasson, J. O., Kachule, M., & Palamountain, K. (2023). Redesigning Sample Transportation in Malawi Through Improved Data

Sharing and Daily Route Optimization. *Manufacturing & Service Operations Management*, *25*(4), 1209–1226. https://doi.org/10.1287/msom.2022.1182

Grasas, A., Ramalhinho, H., Pessoa, L. S., Resende, M. G., Caballé, I., & Barba, N. (2014). On the improvement of blood sample collection at clinical laboratories. *BMC Health Services Research*, *14*(1), 12. https://doi.org/10.1186/1472-6963-14-12

Haitam, E., Najat, R., & Abouchabaka, J. (2021). A Vehicle Routing Problem for the Collection of Medical Samples at Home: Case Study of Morocco. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *12*(4). https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120443

Heidari, R., Ghazanfari, M., & Rasouli, M. R. (2024). A decision support system for resilient vehicle route planning using mathematical modeling and artificial neural networks: A case study. *Kybernetes*. https://doi.org/10.1108/K-10-2024-2935

Huang, S.-H., Huang, Y.-H., & Chiu, L.-C. (2024). Solve the medical specimen collection problem by Ant Colony Optimization. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, *11*(1), 2374968. https://doi.org/10.1080/23302674.2024.2374968

Kang, S., & Fu, X. (2024). Blockchain-Enabled Infection Sample Collection System Using Two-Echelon Drone-Assisted Mechanism. *Drones*, *8*(1), 14. https://doi.org/10.3390/drones8010014

Khoufi, I., Laouiti, A., & Adjih, C. (2019). A survey of recent extended variants of the traveling salesman and vehicle routing problems for unmanned aerial vehicles. *Drones*, *3*(3), 66. https://doi.org/10.3390/drones3030066

Li, W., Ng, T. F., Ibrahim, H., & Wang, S. L. (2025). A literature review of the state of the art of sustainable waste collection and vehicle routing problem. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *75*(1), 3–26. https://doi.org/10.1080/10962247.2024.2415298

Lin, K., Musa, S. N., & Yap, H. J. (2022). Vehicle Routing Optimization for Pandemic Containment: A Systematic Review on Applications and Solution Approaches. *Sustainability*, *14*(4), 2053. https://doi.org/10.3390/su14042053

Maji, S., Pradhan, K., Maity, S., Nielsen, I. E., Giri, D., & Maiti, M. (2023). Emergent multipath COVID-19 specimen collection problem with green corridor through variable length GA. *Expert Systems with Applications*, *232*, 120879. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120879

Mazzanti, C., Anaya-Arenas, A. M., Bélanger, V., Lanzarone, E., & Ruiz, A. (2024). Iterative matheuristic for the biomedical sample transportation problem. *Computers & Industrial Engineering*, *192*, 110196. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110196

McDONALD, J. J. (n.d.). *Vehicle Scheduling—A Case Study*.

Moghdani, R., Salimifard, K., Demir, E., & Benyettou, A. (2021). The green vehicle routing problem: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *279*, 123691. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123691

Naji-Azimi, Z., Salari, M., Renaud, J., & Ruiz, A. (2016). A practical vehicle routing problem with desynchronized arrivals to depot. *European Journal of Operational Research*, *255*(1), 58–67. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.007

National Cancer Institute. (n.d.). *Biological specimen*. NCI Thesaurus. Retrieved Jan 3, 2026, from https://ncithesaurus.nci.nih.gov

Nielsen, P., Dahanayaka, M., Perera, H. N., Thibbotuwawa, A., & Kilic, D. K. (2024). A systematic review of vehicle routing problems and models in multi-echelon distribution networks. *Supply Chain Analytics*, *7*, 100072. https://doi.org/10.1016/j.sca.2024.100072

Oakey, A., Martinez-Sykora, A., & Cherrett, T. (2023). Improving the efficiency of patient diagnostic specimen collection with the aid of a multi-modal routing algorithm. *Computers & Operations Research*, *157*, 106265. https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106265

Oakey, A., Martinez-Sykora, A., & Cherrett, T. (2024). An adapted savings algorithm for planning heterogeneous logistics with uncrewed aerial vehicles. *Multimodal Transportation*, *3*(4), 100170. https://doi.org/10.1016/j.multra.2024.100170

Ocampo-Giraldo, D. M., Anaya-Arenas, A. M., & Contardo, C. (2024). An Iterative Exact Algorithm over a Time-Expanded Network for the Transportation of Biomedical Samples. *INFORMS Journal on Computing*, ijoc.2023.0061. https://doi.org/10.1287/ijoc.2023.0061

Ojeda Rios, B. H., Xavier, E. C., Miyazawa, F. K., Amorim, P., Curcio, E., & Santos, M. J. (2021). Recent dynamic vehicle routing problems: A survey. *Computers & Industrial Engineering*, *160*, 107604. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107604

Ozdemir, I., Dursunoglu, C. F., Y. Kara, B., & Dora, M. (2022). Logistics of temporary testing centers for coronavirus disease. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *145*, 103954. https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103954

Ozkan, O., & Atli, O. (2021). Transporting COVID-19 testing specimens by routing unmanned aerial vehicles with range and payload constraints: The case of Istanbul. *Transportation Letters*, *13*(5–6), 482–491. https://doi.org/10.1080/19427867.2021.1896063

Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., & Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, *225*(1), 1–11. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.08.015

Rostami, P., Sadjadi, S. J., & Rasouli, M. R. (2025). New Model for an Open Vehicle Routing Problem to Optimize the Blood Sample Collection Process within a Network of Clinical Laboratories. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2679*(3), 1–27. https://doi.org/10.1177/03611981241275561

Sar, K., & Ghadimi, P. (2023). A systematic literature review of the vehicle routing problem in reverse logistics operations. *Computers & Industrial Engineering*, *177*, 109011. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109011

Smith, A., Toth, P., Bam, L., & Van Vuuren, J. H. (2022). A multi-tiered vehicle routing problem with global cross-docking. *Computers &*

Operations Research, *137*, 105526. https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105526

Tlili, T., Masri, H., & Krichen, S. (2022). Towards an efficient collection and transport of COVID-19 diagnostic specimens using genetic-based algorithms. *Applied Soft Computing*, *116*, 108264. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108264

Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, *14*(3), 207–222. https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375

Wang, C., Dessouky, M., & Ordóñez, F. (2015). Routing Courier Delivery Services with Urgent Demand. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, *53*(1), 26–39. https://doi.org/10.3138/infor.53.1.26

Wolfinger, D., Gansterer, M., & Doerner, K. F. (2025). *Solving the stochastic dynamic contagious disease testing problem*. https://doi.org/10.1108/LORE-05-2025-0061

Wolfinger, D., Gansterer, M., Doerner, K. F., & Popper, N. (2023). A Large Neighbourhood Search Metaheuristic for the Contagious Disease Testing Problem. *European Journal of Operational Research*, *304*(1), 169–182. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.10.028

World Health Organization. (2015). *Specifications and quantities for efficient procurement of essential equipment and laboratory commodities for HIV* (2nd ed.). https://apps.who.int/iris/bitstream/10665/180980/1/9789241509183_eng.pdf

Yücel, E., Salman, F. S., Örmeci, E. L., & Gel, E. S. (2013a). A constant-factor approximation algorithm for multi-vehicle collection for processing problem. *Optimization Letters*, *7*(7), 1627–1642. https://doi.org/10.1007/s11590-012-0578-1

Yücel, E., Salman, F. S., Gel, E. S., Örmeci, E. L., & Gel, A. (2013b). Optimizing specimen collection for processing in clinical testing laboratories. *European Journal of Operational Research*, *227*(3), 503–514. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.10.044

Zabinsky, Z. B., Dulyakupt, P., Zangeneh-Khamooshi, S., Xiao, C., Zhang, P., Kiatsupaibul, S., & Heim, J. A. (2020). Optimal collection of medical specimens and delivery to central laboratory. *Annals of Operations Research*, *287*(1), 537–564. https://doi.org/10.1007/s10479-019-03260-9

Zhang, J., & Woensel, T. V. (2023). Dynamic vehicle routing with random requests: A literature review. *International Journal of Production Economics*, *256*, 108751. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108751

Zhao, Y., Shen, X., & Ge, Z. (2024). A Knowledge-Guided Multi-Objective Shuffled Frog Leaping Algorithm for Dynamic Multi-Depot Multi-Trip Vehicle Routing Problem. *Symmetry*, *16*(6), 697. https://doi.org/10.3390/sym16060697

Zhou, C., Li, R., Xiong, X., Li, J., & Gao, Y. (2023). Optimization of triage time and sample delivery path in health infrastructure to combat COVID-19. *Engineering, Construction and Architectural Management*, *30*(8), 3620–3644. https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2021-0877

آماده انتشار