

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

- Asma Bakhtiari Tavana**  PhD student in Industrial Management, Allameh Tabataba'i University, Tehran ,Iran.
- Maghsoud Amiri** * Professor, Operations and Information Technology Management Dept., Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran ,Iran.
- Amir Yousefli**  Associate Professor, Industrial Engineering Dept., Faculty of Engineering, University of Zanzan, Zanzan, Iran.
- Mohammad Taghi Taghavifard**  Professor, 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, 32 articles were finally selected and analyzed. The findings revealed that the development of dynamic and multi-objective models, the utilization of real-time decision-making, the broader

* Corresponding Author: amiri@atu.ac.ir

How to Cite:

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, 32 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

اماده انتشار

مرور نظام مند مسائل مسیریابی برای حمل و نقل نمونه های بیولوژیکی در شبکه های آزمایشگاهی

اسماء بختیاری توانا  دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

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

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

محمد تقی تقوی فرد  استاد، گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

چکیده

حمل و نقل نمونه های بیولوژیکی یک مسئله مسیریابی چالش برانگیز در لجستیک مراقبت های بهداشتی محسوب می شود. با توجه به ماهیت فاسدشدنی نمونه ها، رعایت الزامات حمل و نقل از نظر زمان، دما و شرایط فیزیکی آن ها ضروری است. این مسئله بر برنامه ریزی مسیر و زمان بندی برای جمع آوری و انتقال نمونه ها در کوتاه ترین زمان ممکن، بدون کاهش کیفیت آن ها تمرکز دارد. با وجود اهمیت حیاتی این موضوع در نظام سلامت و انتشار پژوهش های متعدد، تاکنون مرور نظام مندی که تصویری جامع از وضعیت موجود تحقیقات پیشین ارائه دهد، انجام نشده است. پژوهش حاضر با رویکرد مرور نظام مند ادبیات به شناسایی، طبقه بندی و تحلیل مطالعات موجود می پردازد تا شکاف های پژوهشی و موضوعات کمتر بررسی شده مشخص شوند. در این راستا، پس از طراحی پروتکل جستجو، بازیابی و غربالگری مقالات، تعداد ۳۳ مقاله نهایی انتخاب و تحلیل شدند. یافته ها نشان داد که توسعه مدل های پویا و چندهدفه، بهره گیری از تصمیم گیری بلادرنگ، استفاده گسترده تر از فناوری های نوآورانه مانند پهپاد، اینترنت اشیاء، بلاکچین و تحلیل کلان داده، و همچنین به کارگیری الگوریتم های یادگیری ماشین از مهم ترین زمینه هایی هستند که می توانند روند پیشرفت تحقیقات در حوزه مسیریابی و زمان بندی حمل و نقل نمونه های بیولوژیکی را تسریع نمایند. این مرور نظام مند با ترسیم وضعیت موجود و تبیین شکاف های پژوهشی، مبنای علمی مناسبی برای مطالعات آتی و ارتقای کارایی شبکه حمل و نقل نمونه های بیولوژیکی فراهم می آورد.

کلیدواژه‌ها: حمل و نقل نمونه‌های بیولوژیکی، مسئله مسیریابی، مسئله مسیریابی پویا، مرور نظام-
مند 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 ۷۰ درصد از تصمیم‌های پزشکی تأثیرگذار است. از این رو، 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 مشتق شده 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 این که 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., ۲۰۲۵). 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 به موقع آغاز شود (Zabinsky et al., 2020). نمونه‌های بیولوژیکی طول عمر کوتاهی دارند که بسته به نوع آن معمولاً بین ۵ تا ۲۴ 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، غیرقابل استفاده شدن نمونه، بیمار را ناچار به نمونه‌گیری مجدد می‌کند که نه تنها 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., 2014; Grasas et al., 2021, 2016). بنابراین، طراحی یک برنامه حمل‌ونقل کارآمد

که هم محدودیت‌های زمانی و هم الزامات ایمنی را رعایت کند، ضروری است.

مسئله حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی^۱ 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. به طور 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، به طور 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^۲ است. مراکز انتقال مسئولیت پردازش اداری، تجمع 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 آن که 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

^۱Biological Samples Transportation Problem

^۲Transit Centers

(لحظه جمع آوری از بیمار) تعریف می شود؛ از این رو، محدودیت زمان تحویل به زمان تولید وابسته است و نمی توان آن را مشابه محدودیت های کلاسیک زمان سفر در نظر گرفت. سومین ویژگی آن است که مدت مجاز یک مسیر توسط نمونه ای تعیین می شود که زودتر فاسد می شود، 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 می کنند (Ocampo-Giraldo et al., 2024).

با توجه به اهمیت این فرآیند، پژوهش های متعددی در زمینه مسیریابی برای حمل و نقل نمونه های بیولوژیکی انجام شده است. با این حال، تاکنون مطالعه ای مروری که به طور خاص این حوزه را بررسی کند، منتشر نشده است. بر همین اساس، پژوهش حاضر با رویکرد مرور نظام مند ادبیات به شناسایی، طبقه بندی و تحلیل مطالعات موجود می پردازد. به بیان دیگر، مقالات منتخب بر اساس معیارهایی همچون نوع مدل برنامه ریزی ریاضی، تعداد و نوع توابع هدف، نوع مسئله مسیریابی، رویکرد مواجهه با عدم قطعیت، ماهیت ایستا یا پویا بودن مسئله، تکنیک حل و فناوری های به کاررفته طبقه بندی و تحلیل می شوند. هدف از این مرور، ارائه تصویری جامع از مطالعات این حوزه، شناسایی شکاف های پژوهشی و موضوعات کمتر بررسی شده و در نهایت، ترسیم مسیرهای بالقوه برای تحقیقات آینده است. در این راستا، پس از گزینش نظام مند مقالات، تحلیل توصیفی به منظور بررسی روند تاریخی، توزیع مقالات بر اساس ناشران و مجلات مرتبط صورت می گیرد. سپس، با بهره گیری از تحلیل محتوای متن مقالات، به سؤالات پژوهش پاسخ داده می شود.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در مطالعات مرتبط با حمل و نقل نمونه های بیولوژیکی، بسته به نوع نمونه، محدودیت های زمانی و شرایط حمل و نقل، مدل های مختلفی از مسائل مسیریابی مورد استفاده قرار گرفته اند؛ از جمله مسئله فروشنده دوره گرد^۱، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه^۲ و مسئله جهت یابی تیمی^۳. TSP به مسئله ای اطلاق می شود 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 ۱۹۵۹ توسط Dantzig and Ramser در ادبیات

^۱ Travelling Salesman Problem (TSP)

^۲ Vehicle Routing Problem (VRP)

^۳ 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 (۱۹۷۲) 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 ۲۰۱۲، وزارت بهداشت و خدمات اجتماعی استان کبک^۱ در کانادا با ایجاد خوشه‌های خدماتی، فرآیند تجزیه و تحلیل نمونه‌ها را متمرکز ساخت. هر خوشه دارای یک آزمایشگاه منطقه‌ای بود که مسئولیت تجزیه و تحلیل 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 ۲۰۱۳ به بعد، توجه جامعه علمی به این مسئله افزایش یافت. در همین راستا، Anaya-Arenas و همکاران (۲۰۱۶) 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 (۲۰۱۶)، Anaya-Arenas و همکاران (۲۰۲۱)، Mazzanti و همکاران (۲۰۲۴) و Ocampo-Giraldo (۲۰۲۴) 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 در اواخر دهه ۱۹۷۰ 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

^۱Quebec

^۲Dynamic Vehicle Routing Problems (DVRP)

سیستم موقعیت‌یابی جهانی^۱، استفاده گسترده از تلفن‌های هوشمند و نیز سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی^۲، 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 ۱، 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 (۲۰۱۶) بر طبقه‌بندی ساختاریافته مسئله کلاسیک مسیریابی وسیله نقلیه متمرکز بوده‌اند؛ در حالی که سایر مطالعات، هر یک به نوع خاصی از این مسئله پرداخته‌اند، از جمله VRP سبز، VRP در لجستیک معکوس، VRP در زنجیره تأمین سرد، VRP پویا، VRP برای مهار همه‌گیری، VRP در شبکه‌های توزیع چندسطحی و VRP جمع‌آوری زباله. همچنین، Cheikhrouhou and Khoufi (۲۰۲۱) 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.

^۱Global Positioning System (GPS)

^۲Geographic Information Systems (GIS)

جدول ۱. 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)	۲۰۱۵- ۲۰۰۹	۲۷۷	مسئله مسیریابی وسیله نقلیه	—	مرور طبقه‌بندی‌شده‌ای از ادبیات VRP، ارائه اولین طبقه‌بندی ساختاریافته از ادبیات VRP
Awad et al. (2021)	۲۰۲۰- ۲۰۰۸	۶۵	مسیریابی وسیله نقلیه در لجستیک زنجیره تأمین 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 زنجیره تأمین سرد
Cheikhrouhou & Khoufi (2021)	۲۰۲۰- ۲۰۰۷	۴۵	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)	۲۰۱۹- ۲۰۰۶	۳۰۹	مسئله مسیریابی	—	مرور کامل و به‌روز مطالعات VRP سبز، ارائه

انواع VRP سبز، بررسی رویکردهای روش شناختی و اهداف مختلف	وسیله نقلیه سبز				
مرور نظام مند و طبقه بندی مطالعات VRP سبز (وسایل نقلیه معمولی، الکتریکی و هیبریدی)، بررسی تکنیک های فرموله بندی، روش های حل و حوزه های کاربردی	مسئله مسیریابی وسیله نقلیه سبز	رویکرد ارائه شده توسط Cooper (2010)	۳۱۳	-۲۰۲۰ ۲۰۰۰	Asghari & Mirzapour Al-e-hashem (2021)
مرور جامع ادبیات VRP در بستر یک بیماری همه گیر، شناسایی جدیدترین اقدامات پیشگیرانه برای جلوگیری از شیوع کووید-۱۹ از منظر تحویل، یافتن روش های ایده آل اجرای عملیات تحویل در راستای مهار بیماری همه گیر	بهینه سازی مسیریابی وسایل نقلیه برای مهار همه گیری	-	۴۶	-۲۰۲۱ ۲۰۰۹	Lin et al. (2022)
تحلیل دقیق پایداری سبز و اجتماعی و تعیین برخی خلاء های مهم، تحلیل جامع رویکردهای مدل سازی تا تکنیک های حل مسئله و از انواع مختلف VRP تا انواع مختلف زیاله و بخش های صنعتی، تحلیل بخشی بر اساس ارزیابی مطالعات موردی	مسئله مسیریابی وسیله نقلیه در عملیات لجستیک معکوس	-	۱۰۹	-۲۰۲۲ ۲۰۰۰	Sar & Ghadimi (2023)
مرور نظام مند پژوهش های مرتبط با VRP پویا، طبقه- بندی جدید VRP پویا بر	مسئله مسیریابی وسیله نقلیه	-	۱۱۸	-۲۰۲۲ ۱۹۸۰	Zhang & Woensel (2023)

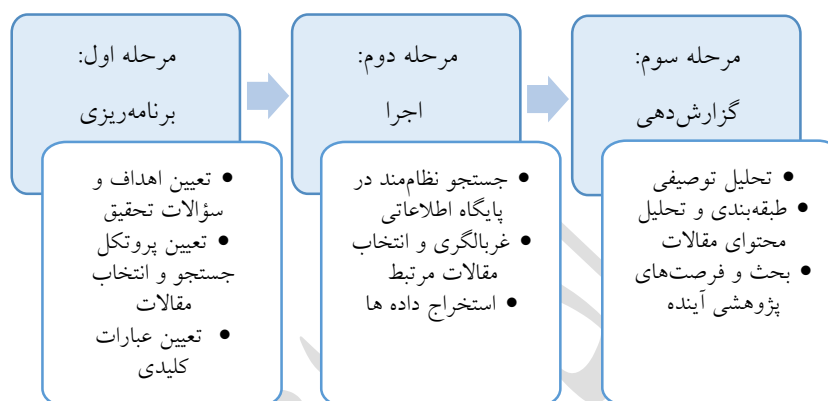
پویا با	اساس سه معیار منبع پویایی،
درخواست-	نوع درخواست و افق برنامه-
های	ریزی، ارائه دیدگاه جدید
تصادفی	برای مرور VRP پویا
	(استراتژی‌های تصمیم‌گیری)
	و بررسی تأثیرات و روش-
	های پیاده‌سازی آن‌ها،
	رویکردهای حل مسئله
	استفاده از ابزار کتاب‌سنجی و
	تحلیل شبکه برای نگاشت
مسائل و	نظام‌مند ادبیات، شناسایی پنج
مدل‌های	خوشه برای مرور نظام‌مند
مسیریابی	(لجستیک سبز و تحلیل
۳۸۲	تصمیم‌گیری، زمان‌بندی و
-۲۰۲۳	بهینه‌سازی موجودی، VRP
۱۹۸۵	برای لجستیک شهری،
Nielsen et al.	مدل‌سازی ریاضی و
(2024)	بهینه‌سازی، لجستیک
	خروجی و خدمات مشتری)
	مرور گسترده مطالعات VRP
مسئله	جمع‌آوری زباله، بررسی
مسیریابی	طبقه‌بندی زباله، ویژگی‌های
۱۳۰	مدل، توابع هدف و
-۲۰۲۴	روش‌های حل، ایجاد ارتباط
۲۰۲۰	بین VRP جمع‌آوری زباله و
Li et al.	اهداف توسعه پایدار
(2025)	

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 ۱ مراحل اجرای

مرور نظام‌مند ادبیات در حوزه مورد بررسی را بر اساس رویکرد ارائه شده توسط Tranfield و همکاران (۲۰۰۳) نشان می‌دهد. در راستای دستیابی به اهداف پژوهش حاضر، سؤالات زیر مطرح گردید:

شکل ۱. مراحل انجام مرور نظام‌مند ادبیات

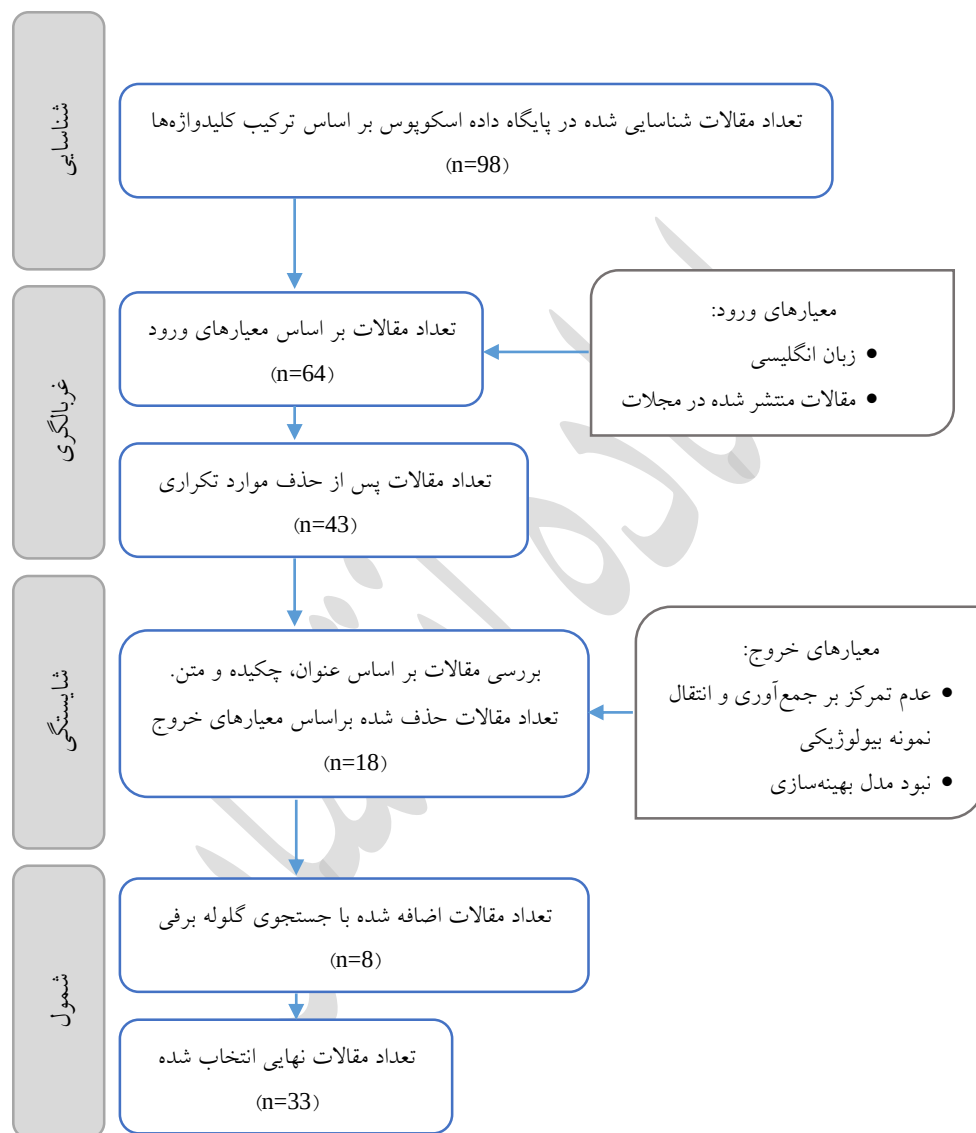


۱. چه رویکردهایی برای مدل‌سازی در مطالعات مورد بررسی به کار رفته است؟
 ۲. چه تکنیک‌هایی برای حل مدل‌های ارائه شده مورد استفاده قرار گرفته است؟
 ۳. از چه نوع فناوری‌های نوآورانه‌ای در حوزه حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی بهره گرفته شده است؟
- در شکل ۲، یک نمایش گرافیکی از فرآیند انتخاب مقالات برای مرور انتقادی ادبیات، مطابق با بیانیه پریزما^۱ ارائه شده است. این بیانیه شامل چهار مرحله است: شناسایی، غربالگری، شایستگی و شمول. در مرحله شناسایی، تعداد ۹۸ مقاله اولیه با استفاده از ترکیب‌های مختلف واژگان کلیدی (جدول ۲) در پایگاه اطلاعاتی اسکوپوس بازیابی شد. در مرحله غربالگری، با اعمال معیارهای ورود شامل مقالات منتشر شده در مجلات علمی و نگارش به زبان انگلیسی، ۳۴ مقاله حذف گردید. از میان مقالات باقی‌مانده، ۲۱ مقاله به دلیل تکراری بودن کنار گذاشته شد و بدین ترتیب ۴۳ مقاله برای بررسی‌های بعدی در نظر گرفته شد. در مرحله شایستگی، با بررسی عنوان، چکیده و متن مقالات، ۱۸ مقاله غیرمرتبط از فرآیند مرور انتقادی بر اساس معیارهای خروج خارج شدند. معیارهای خروج شامل عدم تمرکز بر جمع‌آوری و

^۱PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses)

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 استندهای مقالات منتخب بررسی گردید و در نتیجه ۸ مقاله دیگر به فهرست نهایی اضافه شد. درنهایت، ۳۳ مقاله نهایی برای تحلیل و مرور انتقادی انتخاب گردید.

آماده انتشار



شکل ۲. فرآیند گزینش مقالات (جریان پریزما)

جدول ۲. عبارات کلیدی

عبارات کلیدی	تعداد مقالات	زمینه جستجو	بازه زمانی
“Vehicle Routing” and “Biological Sample” or “Biomedical Sample” or “Medical Sample” or “Blood Sample”	۳۱	عنوان، چکیده	
“Vehicle Routing” and “Sample Transportation” or “Sample Collection”	۱۸	و واژگان	نامحدود
“Vehicle Routing” and Specimen	۱۵	کلیدی	
Routing and “Sample Collection” or “Specimen Collection”	۳۴		

یافته‌ها

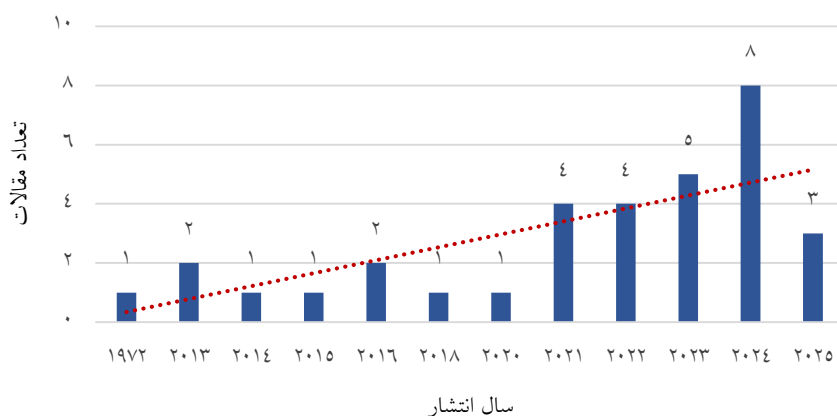
در این بخش ابتدا تحلیل توصیفی شامل اطلاعاتی مانند توزیع مقالات بر اساس سال، ناشر و محبوب‌ترین مجلات هر ناشر ارائه می‌شود. در ادامه، طبقه‌بندی و تحلیل محتوای مقالات به منظور پاسخ‌گویی به سؤالات پژوهش انجام می‌گیرد.

تحلیل توصیفی

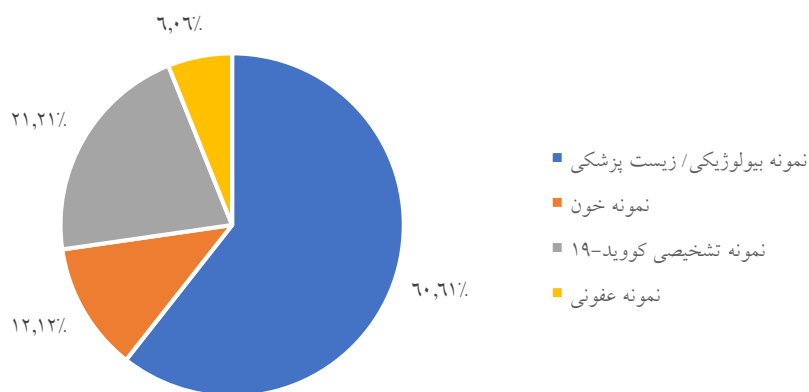
شکل ۳ روند تعداد مقالات منتشر شده در مجلات علمی را طی بازه زمانی ۱۹۷۲ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، تعداد مقالات در این دوره به‌طور کلی روندی افزایشی داشته است، به‌خصوص در سال ۲۰۲۴، که بیشترین تعداد مقالات (نزدیک به ۸ مقاله) در مجلات مختلف منتشر شده است. همچنین، حدود ۷۳ درصد از کل مقالات مربوط به سال‌های پس از ۲۰۲۱ است. این روند افزایشی پس از سال ۲۰۲۱، احتمالاً ناشی از شیوع جهانی ویروس کووید-۱۹ و اعلام رسمی پاندمی از سوی سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۲۰ است. با آغاز شیوع جهانی این ویروس، در سال‌های ۲۰۲۱، ۲۰۲۲، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۵ مقالاتی در حوزه مسیریابی حمل‌ونقل نمونه‌های تشخیصی کووید-۱۹ منتشر شده‌اند که سهم آن‌ها از کل مطالعات این حوزه ۲۱/۲۱ درصد است (شکل ۴). اهمیت این پژوهش‌ها در آن است که در شرایط اضطراری اپیدمی، جمع‌آوری و انتقال به‌موقع نمونه‌های آزمایش کووید-۱۹ 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) به طور خاص بر حمل و نقل نمونه های عفونی مرتبط با بیماری های واگیر تمرکز داشته اند.

شکل ۳. توزیع مقالات بر اساس سال



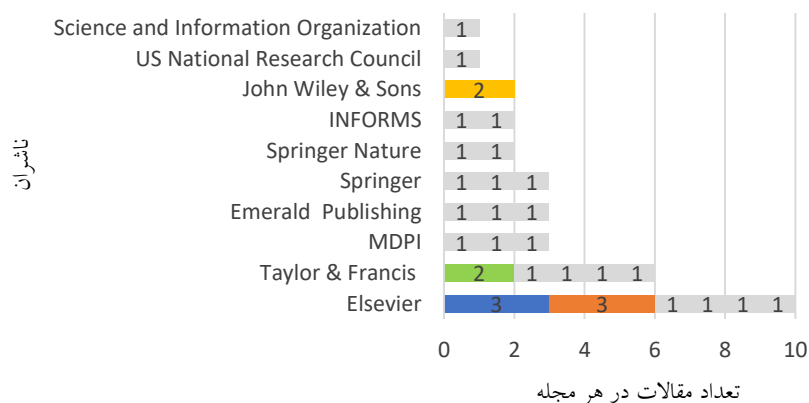
شکل ۴. درصد مقالات منتشر شده بر اساس نوع نمونه های زیستی



شکل ۵ نمودار توزیع مقالات جمع آوری و انتقال نمونه بیولوژیکی را بر اساس ناشران و مجلات مرتبط با هر ناشر نشان می دهد. مقالات این حوزه در ۲۷ مجله مختلف منتشر شده

است که در این نمودار تنها چهار مجله که بیشترین تعداد مقالات را منتشر کرده‌اند، با رنگ-های 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 ۳۰ درصد) را دارا است. پس از آن، ناشر Taylor & Francis از نظر تعداد و درصد مقالات انتشار یافته در رتبه دوم قرار دارد. به‌طور کلی، 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 ۵. توزیع مقالات بر اساس هر ناشر و مجله‌های آن



- European Journal of Operational Research
- Computers & Industrial Engineering
- Journal of the Operational Research Society
- International Transactions in Operational Research
- International Journal of Advanced Computer Science and Applications

جدول ۳. طبقه‌بندی مطالعات انجام شده در زمینه مسئله مسیریابی برای حمل و نقل نمونه‌های بیولوژیکی

نویسنده و سال	نوع مسئله	تعداد تابع هدف		نوع مدل	ماهیت مسئله		وضعیت پارامترها		تکنیک حل	فناوری نوآورانه
		تک هدفه	چند هدفه		ایستا	پوی	قطعی	غیر قطعی		
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. (۲۰۱۸)	✓	×	×	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	✓	×	✓	×	حل کننده 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	تک هدفه		چند هدفه	آپست	تجزیه	قطعی			غیرقطعی
Gibson et al. (۲۰۲۳)	✓	×	×	✓	×	MILP	×	✓	✓	×	دقیق	×
Oakey et al. (۲۰۲۳)	✓	×	×	×	✓	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 مدل سازی

در شکل ۷، روند به کارگیری انواع مدل های برنامه ریزی ریاضی در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۵ نشان داده شده است. مدل های ریاضی مورد بررسی در این حوزه در چهار دسته کلی فرموله

شده‌اند: برنامه‌ریزی خطی عددصحيح^۱، برنامه‌ریزی خطی عددصحيح مختلط^۲، برنامه‌ریزی غيرخطی عددصحيح^۳ و برنامه‌ریزی غيرخطی عددصحيح مختلط^۴. تا سال ۲۰۲۱، مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحيح مختلط به عنوان رویکرد غالب در مدل‌سازی مسائل حمل‌ونقل نمونه‌های بیولوژیکی به کار گرفته شده است. اما از سال ۲۰۲۲ به بعد، تنوع قابل توجهی در نوع مدل‌های مورد استفاده مشاهده می‌شود. این تنوع احتمالاً ناشی از وجود روابط غيرخطی در توابع هدف و محدودیت‌های مدل‌ها و همچنین افزایش پیچیدگی ساختار آنهاست. در این بازه زمانی، حدود ۵۹ درصد مقالات از رویکرد برنامه‌ریزی عددصحيح 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 غيرخطی که حل آنها به مراتب دشوارتر است، سهم کمتری در مقالات مورد بررسی دارند و تنها حدود ۱۴ 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.

^۱Integer Linear Programming (ILP)

^۲Mixed-Integer Linear Programming (MILP)

^۳Integer Non-linear Programming (INLP)

^۴Mixed-Integer Non-linear Programming (MINLP)

شکل ۷. تحلیل روند به کارگیری انواع مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی



علاوه بر این، حدود ۷۶ درصد از مطالعات مرتبط با حمل و نقل 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 پهباد ناهمگن دو سطحی با همگام‌سازی نقاط ترانزیت اشاره کرد. در مقابل، تنها دو مطالعه به مدل‌سازی مسئله فروشنده دوره گرد برای حمل و نقل نمونه‌های بیولوژیکی پرداخته‌اند (Maji et al., 2023; Zhou et al., 2023). به طور کلی، بر اساس شواهد موجود، نوع مسئله حمل و نقل نمونه‌های بیولوژیکی (به استثنای نمونه‌های کووید-۱۹)، عمدتاً در دسته مسائل VRP قرار می‌گیرد.

Yücel و همکاران (۲۰۱۳، ۲۰۱۳) مسئله‌ای با عنوان «جمع‌آوری برای پردازش» را بررسی کرده‌اند که با مسائل کلاسیکی چون VRP و TSP متفاوت است؛ چرا که علاوه بر مسیریابی و تعیین توالی بازدیدها، زمان‌بندی بازدید از هر مکان نیز مشخص می‌شود. همچنین به دلیل وابستگی متقابل میان تورها، طراحی آن‌ها باید به طور همزمان انجام گیرد. از دیگر تفاوت‌های این مسئله با مسائل مشابه آن است که تصمیمات حمل و نقل 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 (۲۰۲۲) مسئله جمع‌آوری و انتقال نمونه‌های

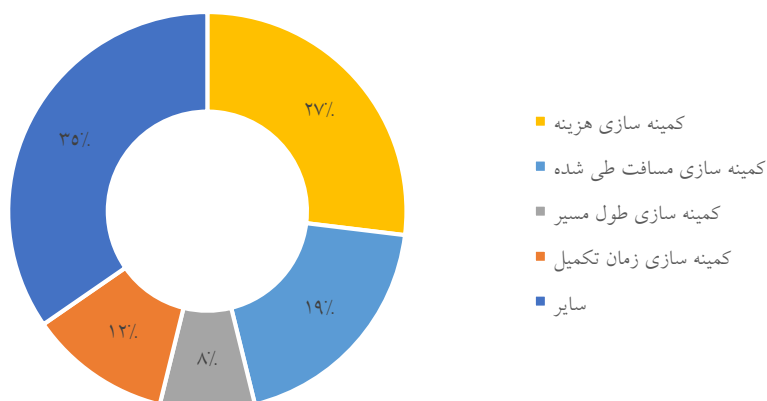
کووید-۱۹ را به صورت یک مسئله جهت‌یابی تیمی با مبدأ و مقصدهای چندگانه مدل‌سازی کرده‌اند. تفاوت این مدل با TOP در آن است که ایستگاه نهایی دارای ظرفیت مشخصی است و آمبولانس‌ها از نقاط شروع متفاوت حرکت می‌کنند. هدف اصلی، یافتن مسیرهای بهینه برای آمبولانس‌ها به منظور بیشینه‌سازی امتیازهای تریاژ جمع‌آوری شده بیماران است، به گونه‌ای که محدودیت‌هایی مانند ظرفیت بیمارستان‌ها و حداکثر زمان مجاز هر مسیر نیز رعایت شود. Wolfinger و همکاران (۲۰۲۳) 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 (۲۰۲۵) نیز نسخه پویا و تصادفی این مسئله را ارائه کرده‌اند. علاوه بر این، Ocampo-Giraldo و همکاران (۲۰۲۴) 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 زمان گسترارائه 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 ۸ درصد استفاده از توابع هدف مختلف را در مدل‌های تک‌هدفه مطالعات مورد بررسی نشان می‌دهد. حدود ۷۵ 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 ۱۹ درصد دومین تابع هدف با بیشترین فراوانی است. پس از آن کمینه‌سازی زمان تکمیل با سهم ۱۲ درصد قرار می‌گیرد که به معنای اختلاف بین زمان در دسترس بودن نمونه برای جمع‌آوری و زمان رسیدن آن به آزمایشگاه مرکزی است. Fu and Kang (۲۰۲۴) این معیار را به عنوان «سن نمونه» تعریف کرده‌اند. همچنین، کمینه‌سازی طول مسیر در ۸ 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 که تنها یک‌بار در مطالعات استفاده شده‌اند (۳۵ درصد) شامل اهداف رایج مسئله مسیریابی

^۱Multi-Origin–Destination Team Orienteering Problem (MODTOP)

مانند کمیته‌سازی زمان سفر، زمان تأخیر، تعداد وسایل نقلیه، و اهداف خاص مانند کمیته - سازی میانگین زمان گردش نمونه‌ها در شبکه تشخیصی، یا زمان تکمیل پردازش نمونه‌ها هستند. Maji و همکاران (۲۰۲۳) نیز کمیته‌سازی زمان کل سیستم (شامل زمان سفر، زمان اضافی مانند ترافیک و عوارض، زمان توقف و بارگیری) و کمیته‌سازی زمان کریدور سبز^۱ 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 حمل - و نقل بدون توقف، هدف کمیته‌سازی این زمان است. در پژوهشی دیگر، Tlili و همکاران (۲۰۲۲) 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 جمع‌آوری شده از بیماران حداکثر شود.

شکل ۸. درصد استفاده از توابع هدف مختلف در مدل‌های تک‌هدفه



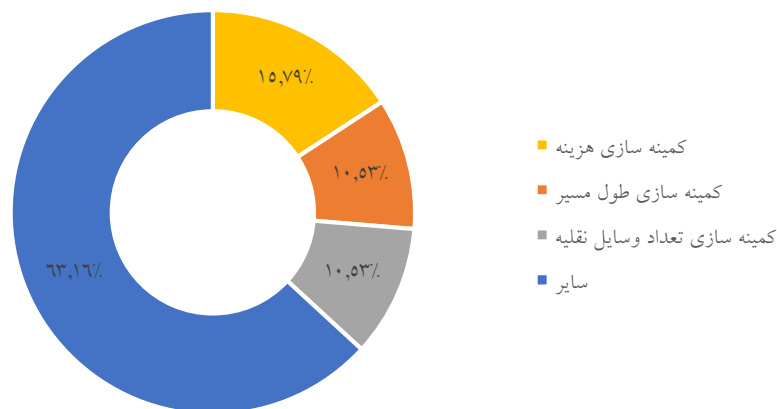
^۱Green Corridor

در شکل ۹ نیز درصد استفاده از توابع هدف مختلف در مدل‌های چندهدفه نشان داده شده است. حدود ۲۵ 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 ۸ مقاله، ۵ مقاله دو هدفه و ۳ 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 (۱۵/۷۹ 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 (۶۳/۱۶ درصد) تنها یک‌بار استفاده شده‌اند و بعضی از آن‌ها برای نخستین بار توسط نویسندگان همان مطالعه معرفی شده‌اند. به عنوان نمونه، Kang & Fu (۲۰۲۴) شاخص «مواجهه» را برای ارزیابی عملکرد همزمان پهباد جمع‌آوری‌کننده و پهباد تحویل‌دهنده و سنجش ایمنی نمونه‌های عفونی پیشنهاد کردند. این شاخص میزان نگهداری نمونه و همگام‌سازی در عملیات تحویل را اندازه‌گیری می‌کند. در جدول ۴ 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-۱۹، به دلیل حساسیت زمانی کمتر این نوع نمونه‌ها نسبت به سایر نمونه‌های بیولوژیکی، اهدافی مانند کمینه‌سازی مسافت و هزینه و بیشینه‌سازی تعداد نمونه جمع‌آوری 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 کمینه‌سازی 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.

^۱Exposure

شکل ۹. درصد استفاده از توابع هدف مختلف در مدل‌های چندهدفه



جدول ۴. انواع توابع هدف در مدل‌های چندهدفه

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

شکل ۱۰ روند نوع مسئله (ایستا یا پویا و قطعی یا غیرقطعی) را در ادبیات مرتبط با مسئله حمل و نقل نمونه‌های بیولوژیکی نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، تا سال ۲۰۲۲، تمامی مطالعات انجام شده، مسئله را به صورت ایستا در نظر گرفته‌اند. سهم کلی مسائل ایستا در بازه زمانی ۱۹۷۲ تا ۲۰۲۵، برابر با ۸۵ 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 ۲۰۲۳ به بعد، نشانه‌هایی از گذار به سمت مسائل پویا دیده می‌شود؛ به گونه‌ای که در سال ۲۰۲۴ سهم مطالعاتی که مسئله مسیریابی پویا را بررسی کرده‌اند، به ۳۷/۵ درصد رسیده است. در میان این مطالعات، تنها یک پژوهش به مدل‌سازی مسئله در حالت پویا و قطعی اختصاص یافته است، در حالی که سه پژوهش دیگر نسخه پویا و غیرقطعی این مسئله را مورد بررسی قرار داده‌اند.

به عنوان مثال، Zhao و همکاران (۲۰۲۴) به منظور پاسخگویی به چالش‌های 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 (۲۰۲۳) یک سیستم بهینه برای حمل و نقل نمونه‌های پزشکی طراحی کردند که تغییرپذیری تقاضا را در نظر می‌گیرد. این سیستم شامل دو جزء است: (۱) یک رویکرد جدید برای جمع‌آوری به موقع اطلاعات تقاضای حمل و نقل (نمونه‌ها و نتایج) با استفاده از فناوری کم هزینه مبتنی بر تلفن همراه و (۲) یک رویکرد حل مبتنی بر بهینه‌سازی برای زمان‌بندی و مسیریابی پویای سفرهای پیک در یک سیستم حمل و نقل چند مرحله‌ای. Heidari و همکاران (۲۰۲۴) یک سیستم پشتیبان تصمیم^۱ برای برنامه‌ریزی اولیه و مجدد پویای مسیر حمل و نقل نمونه‌های پزشکی از آزمایشگاه‌های بالینی به آزمایشگاه مرکزی طراحی کردند که از عملیات بلادرنگ پشتیبانی می‌کند. سیستم پیشنهادی ۴ 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 (۲۰۲۴) برای مقابله با چالش ناشی از پویایی و عدم قطعیت در زمان ارسال درخواست کاربران، یک طرح جمع‌آوری نمونه پویا مبتنی بر

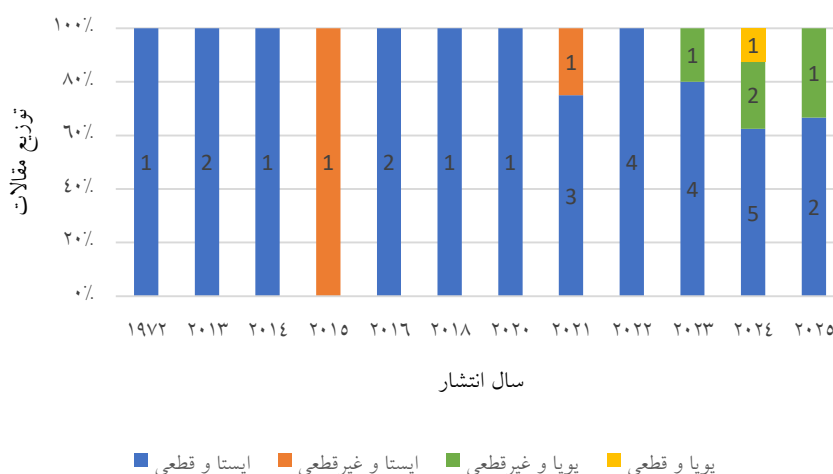
^۱Decision Support System (DSS)

یادگیری تقویتی عمیق پیشنهاد کردند. Wolfinger و همکاران (۲۰۲۵) 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 ۵، 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، مواجهه مؤثر با این تغییرات پویا نیازمند مدل‌سازی‌هایی واقع‌گرایانه شامل زمان‌بندی و مسیریابی بلادرنگ است.

شکل ۱۰. تحلیل روند نوع مسئله از منظر ایستایی و پویایی



جدول ۵. 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 در دسترس 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 بیماری	ورود تصادفی موارد جدید مشکوک به بیماری

تکنیک‌های حل

شکل ۱۱ روند تاریخی استفاده از تکنیک‌های مختلف حل مسئله مسیریابی را برای حمل-ونقل نمونه‌های بیولوژیکی در بازه زمانی ۱۹۷۳ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد. همان‌طور که در

جدول قابل مشاهده است، این مسائل در مطالعات مختلف با الگوریتم‌های حل دقیق^۱، حل-کننده دقیق^۲، ابتکاری^۳، فراابتکاری^۴، بهینه‌سازی تقریبی^۵، یادگیری ماشین^۶ و الگوریتم‌های حل ترکیبی^۷ 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 ۵، در سال‌های ابتدایی الگوریتم‌های حل ابتکاری بیشترین کاربرد را داشتند. اما از سال ۲۰۱۴ به بعد، الگوریتم‌های حل فراابتکاری به تدریج 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 بزرگ مقیاس 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 (۲۰۲۴) الگوریتم دقیقی برای حل نمونه‌های بزرگ شبکه مراقبت‌های بهداشتی توسعه دادند که از روش کشف گسسته‌سازی پویا^۸ بهره می‌برد. به گفته نویسندگان، این الگوریتم اولین روش دقیق برای حل مسئله حمل-ونقل نمونه‌های زیست‌پزشکی است که به‌طور کارآمدی ملاحظات زمانی و تعداد بالای دوره‌ها و اقلام را مدیریت می‌کند.

از سال ۲۰۱۵ 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،

^۱Exact Solution Algorithms

^۲Exact Solver

^۳Heuristics

^۴Metaheuristics

^۵Approximate Optimization

^۶Machine Learning

^۷Hybrid Solution Algorithms

^۸Dynamic Discretization Discovery (DDD)

رویکردهای ریاضی‌ابتکاری^۱ 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 سایر روش‌ها مانند الگوریتم‌های حل دقیق و فراابتکاری به صورت ترکیبی به کار رفته‌اند.

در سال‌های اخیر، به‌ویژه در سال ۲۰۲۴، 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 (۲۰۲۴) 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^۲ 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 به موقع به درخواست‌های جدید برای جمع‌آوری نمونه‌های عفونی پاسخ دهد.

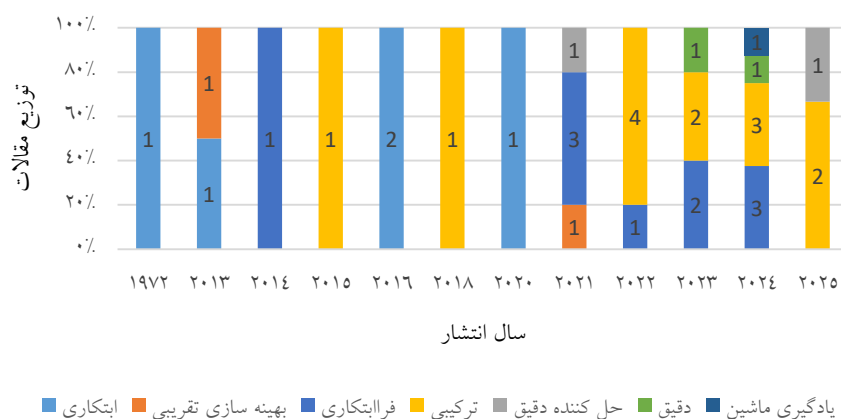
شکل ۱۲، درصد استفاده از رویکردهای مختلف حل را برای درک بهتر سهم هر یک نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، بیشترین سهم به الگوریتم‌های حل ترکیبی (۳۷/۱۴ درصد) و الگوریتم‌های فراابتکاری (۲۸/۵۷ درصد) تعلق دارد و در حال حاضر، این دو رویکرد بیشترین توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. پس از آن، الگوریتم‌های ابتکاری (۱۴/۲۹ درصد)، الگوریتم‌های حل دقیق، حل‌کننده‌های دقیق و بهینه‌سازی تقریبی (۵/۷۱ درصد) در رده بعدی قرار دارند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیز با سهم ۲/۸۶

^۱Matheuristic

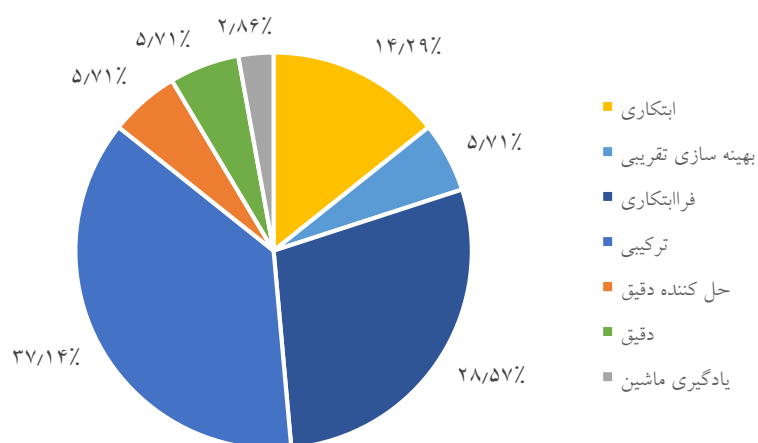
^۲Deep Reinforcement Learning

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

شکل ۱۱. تحلیل روند تکنیک حل



شکل ۱۲. 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 به کار 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 ۶ 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^۱ (پهپادها) هستند که پتانسیل قابل توجهی 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 (۲۰۲۱) به منظور افزایش سرعت پاسخدهی آزمایش‌های PCR^۲ در دوران شیوع کووید-۱۹، یک مدل ریاضی برای مسئله مسیریابی پهپادهای دارای ظرفیت برد و بار طراحی کردند. Oakey و همکاران (۲۰۲۴) 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^۴ 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

^۱Uncrewed Aerial Vehicles (UAV)

^۲Drone

^۳Polymerase Chain Reaction

^۴Internet 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 حمل و نقل، 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 (۲۰۲۴) 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 ۴/۵G و سامانه‌های شناسایی با امواج رادیویی^۱) تلفن‌های هوشمند و سیستم‌های موقعیت‌یابی اطلاعات مورد نیاز را از کاربران و پهپادها دریافت می‌کند. این اطلاعات شامل (۱) داده‌های مربوط به درخواست کاربران برای جمع‌آوری نمونه‌های عفونی و هویت آن‌ها، (۲) اطلاعات مربوط به وضعیت جمع‌آوری پهپادها (موقعیت، سرعت، انرژی، خطاها، مسیرها و زمان رسیدن پهپاد)، و (۳) شرایط محیطی حمل و نقل (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 (۲۰۲۴) با هدف بهبود ایمنی و جمع‌آوری به موقع نمونه‌های عفونی، سه فناوری نوظهور شامل اینترنت اشیاء، بلاکچین^۲ 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.

^۱Radio Frequency Identification (RFID)

^۲Blockchain

هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیز در این حوزه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه، Heidari و همکاران (۲۰۲۴) 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 (۲۰۲۴) الگوریتم یادگیری تقویتی عمیق را برای مسیریابی سریع و پویای پهپادها به کار گرفتند. سیستم موقعیت‌یابی جهانی^۱ نیز در مطالعاتی چون Fu and Kang (۲۰۲۴)، Kang and Fu (۲۰۲۴)، Heidari و همکاران (۲۰۲۴) 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 واکنش-پذیری سیستم‌های حمل‌ونقل دارند و این می‌تواند زیرساختی مؤثر برای پاسخگویی سریع و هوشمندانه به بحران‌های بهداشتی آتی باشد.

جدول ۶. 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)

^۱Global Positioning System (GPS)

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

بحث و فرصت‌های پژوهشی آینده

به دلیل عدم دسترسی بلادرننگ 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 (۱۵ 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 در لحظه فراهم می‌کند. در مسیریابی 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 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 (۲۰۲۴) 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 اشیا 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

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 ۲۵ 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 ۱۱، 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 بزرگ مقیاس 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 این رو، 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 حل زیرمسئله‌ها در برخی مطالعات (مانند Heidari et al., 2024; Ferone et al., 2025) 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 دقت خوشه‌بندی و کارایی محاسباتی، مناسب‌ترین گزینه را برای مسئله 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 ۶). این فناوری‌ها عمدتاً در مطالعات مرتبط با حمل‌ونقل نمونه‌های عفونی، به‌ویژه نمونه‌های کووید-۱۹ 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 بهره‌گیرند. 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 اشیا جمع آوری می شوند، می توانند به صورت همزمان پردازش شده و مسیرهای بهینه تعیین گردند. علاوه بر این، داده های تولید شده توسط حسگرهای مختلف (مانند دما و رطوبت جعبه های حمل نمونه) می توانند تحلیل شوند تا انحراف های احتمالی از مقادیر استاندارد شناسایی شود و کیفیت نمونه ها در طول فرآیند حمل تضمین شود. در شرایط بحرانی نظیر اپیدمی ها، تحلیل کلان داده ها در ترکیب با الگوریتم های یادگیری ماشین، علاوه بر تصمیمات واکنشی و بلادرنگ، امکان پیش بینی روند گسترش بیماری و شناسایی مناطق یا مراکزی که بیشترین تقاضا برای جمع آوری نمونه را دارند فراهم می آورد. به عنوان نمونه، Kang and Fu (۲۰۲۴) فناوری بلاکچین را برای ذخیره سازی ایمن داده های نمونه های عفونی و ثبت منشأ و تغییرات آن ها به کار گرفته اند. هرچند این مطالعه به تحلیل کلان داده ها نپرداخته است، داده های امن و قابل ردیابی ذخیره شده در بلاکچین می توانند مبنایی ارزشمند برای تحلیل روند شیوع بیماری فراهم آورند.

نتیجه گیری

در این پژوهش، مرور نظام مند ادبیات مرتبط با حمل و نقل نمونه های بیولوژیکی در شبکه آزمایشگاهی در سه مرحله انجام شد. پس از بازبینی و غربالگری مقالات، تعداد ۳۳ مقاله برای تحلیل انتخاب شدند. روند رو به رشد انتشار مقالات طی سال های اخیر بیانگر اهمیت روزافزون این موضوع به عنوان یک مسئله لجستیکی حساس و پیچیده است. با وجود این روند افزایشی، تاکنون مطالعه ای مبروری که تصویری جامع از پژوهش های پیشین ارائه دهد گزارش نشده است. از منظر نوآوری نظری، این پژوهش تلاش کرده است که با تمرکز بر رویکردهای مدل سازی، تکنیک های حل و فناوری های مورد استفاده، تصویری جامع و به روز از وضعیت موجود این حوزه ترسیم کند.

یافته های پژوهش حاضر نشان داد که بخش عمده ای از مطالعات بر VRP متمرکز بوده اند و اغلب مدل ها به دلیل ماهیت متغیرهای تصمیم مسائل مسیریابی به صورت برنامه ریزی عدد صحیح مختلط فرموله شده اند. از منظر تکنیک های حل، گذار تدریجی از الگوریتم های ابتکاری به سمت الگوریتم های ترکیبی بیانگر نیاز به روش هایی است که بتوانند به طور همزمان کیفیت جواب و کارایی محاسباتی را بهبود دهند. افزون بر این، به کارگیری الگوریتم های یادگیری ماشین طی سال های اخیر ظرفیت های نوینی برای حل مسائل بزرگ-مقیاس فراهم کرده است. طبقه بندی مقالات نشان داد که اغلب پژوهش ها 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 ۲۰۲۳ 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 هیچ گونه تعارض منافع 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

1. 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>
2. 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>
3. 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>
4. 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>
5. 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>
6. Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuysse, 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>
7. 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>
8. 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>
9. 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>
10. 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>
11. 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>

۱۲. 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>
۱۳. 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>
۱۴. 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>
۱۵. 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>
۱۶. 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>
۱۷. 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>
۱۸. **Khoufi, I., Laouti, 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>**
۱۹. 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>
۲۰. 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>
۲۱. 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>
۲۲. 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>
٢٣. McDONALD, J. J. (n.d.). *Vehicle Scheduling—A Case Study*.
٢٤. 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>
٢٥. 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>
٢٦. **National Cancer Institute. (n.d.). *Biological specimen*. NCI Thesaurus. Retrieved Jan 3, 2026, from <https://ncithesaurus.nci.nih.gov>**
٢٧. 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>
٢٨. 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>
٢٩. 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>
٣٠. 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>
٣١. 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>
٣٢. 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>
٣٣. 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>
٣٤. 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>

۳۵. 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>
۳۶. 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>
۳۷. 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>
۳۸. 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>
۳۹. 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>
۴۰. 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>
۴۱. 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>
۴۲. 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>
۴۳. **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
۴۴. 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>

٤٥. 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>
٤٦. 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>
٤٧. 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>
٤٨. 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>
٤٩. 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>