سامانه‌های پردازشی و ارتباطی چندرسانه‌ای هوشمند
Intelligent Multimedia Processing and Communication Systems (IMPCS)

Fall 2024, 5 (3), 33-46
DOI: 10.71856/impcs.2024.1120332

Received: 26 Jun 2024
Accepted: 6 Aug 2024

مقاله پژوهشی

A Novel Approach for School Bus Routing Using White Shark Optimizer Algorithm

Mohammad Salemifar[1], Mohammadreza Mohammadrezaei[2*]

1. MSc, Department of Computer Engineering, Bardsir Branch, Islamic Azad University, Bardsir, Iran. Sf.mohammad1986@gmail.com
2. Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Ramhormoz Branch, Islamic Azad University, Ramhormoz, Iran. **Corresponding Author*, Mohammadrezaei.m.reza@gmail.com

Abstract

Introduction: School Bus Routing Problem (SBRP) is a complex transportation challenge that involves finding optimal bus routes. addressing urgent issues such as increased traffic load, high student population, lack of resources, safety, and hazards can play an essential role in designing an efficient program for the student transportation system. The importance of this issue is highlighted when the needs and expectations of all stakeholders, including students, the private sector, and municipalities, are considered.

Method: The goal of SBRP is to design routes for the school bus fleet that pick up students at a series of pre-defined bus stops and drop them off at school. This problem is known as NP-Hard; It is therefore important to address the issue of school bus routing to ensure a safe and cost-effective solution for students, parents and stakeholders. However, there are challenges in terms of limitations and multiple objectives. In this paper, the school bus routing problem is formulated as an optimization problem. To solve this problem, the white shark optimization algorithm has been used.

Results: The proposed method has been implemented in MATLAB simulator. The number of students is 100. The number of buses is 7 and the number of schools is 5. The evaluation criteria included the total travel distances of school services, the average commuting time of students, the total travel time and the desirability of routing.

Discussion: The proposed method has been able to improve the evaluation criteria compared to the basic plan based on the genetic algorithm and the method based on the ant algorithm.

Keywords: SBRP, School Bus Routing Problem, White Shark Optimizer algorithm.

سامانه‌های پردازشی و ارتباطی چندرسانه‌ای هوشمند
Intelligent Multimedia Processing and Communication Systems (IMPCS)
انجمن علمی تجارت الکترونیکی ایران
واحد زنجان

یک رویکرد جدید برای مسیریابی اتوبوس مدرسه با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید

تاریخ دریافت: ۰۶/ ۰۴/ ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۶/ ۰۵/ ۱۴۰۳

دورهٔ پنجم، پاییز ۱۴۰۳
شمارهٔ دوم، صص: ۳۳-۴۶

محمد سالمی‌فر[۱]، محمدرضا محمدرضائی[۲*]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد بردسیر، دانشگاه آزاد اسلامی، بردسیر، ایران.
۲- استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز، ایران. (نویسنده مسئول)
Mohammadrezaei.m.reza@gmail.com

چکیده: مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه (SBRP) چالش پیچیده‌ای در حمل‌ونقل است که شامل یافتن مسیرهای اتوبوس بهینه است. پرداختن به مسائل اضطراری مانند افزایش بار ترافیک، جمعیت بالای دانش‌آموزان، کمبود منابع، ایمنی و خطرات می‌تواند نقش اساسی در طراحی یک برنامه کارآمد برای سیستم حمل‌ونقل دانش‌آموزی داشته‌باشد. اهمیت این موضوع زمانی برجسته می‌شود که نیازها و انتظارات همه ذی‌نفعان از جمله دانش‌آموزان، بخش خصوصی و شهرداری‌ها درنظرگرفته‌شوند. هدف SBRP طراحی مسیرهایی برای ناوگان اتوبوس مدرسه است که دانش‌آموزان را در یک سری از ایستگاه‌های اتوبوس از پیش تعریف‌شده سوارمی‌کند و آن‌ها را در مدرسه پیاده‌می‌کند. این مسئله به‌عنوان NP-Hard شناخته‌می‌شود؛ بنابراین پرداختن به مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه برای اطمینان از راه‌حل ایمن و مقرون‌به‌صرفه برای دانش‌آموزان، والدین و ذی‌نفعان مهم است. بااین‌حال، چالش‌هایی از نظر محدودیت‌ها و اهداف متعدد وجوددارد. در این مقاله، مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه به‌عنوان مسئله بهینه‌سازی فرموله شده‌است. برای حل این مسئله از الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید استفاده‌شده‌است. روش پیشنهادی در شبیه‌ساز متلب اجرا شده‌است. تعداد دانش‌آموز، ۱۰۰ در نظر گرفته‌شده‌است. تعداد اتوبوس، ۷ اتوبوس و تعداد مدرسه، ۵ مدرسه است. معیارهای ارزیابی شامل مجموع فواصل حرکت سرویس‌های مدارس، میانگین زمان رفت‌وآمد دانش‌آموزان، کل زمان سفر و مطلوبیت مسیریابی بوده‌اند. روش پیشنهادی توانسته‌است معیارهای ارزیابی را نسبت به طرح پایه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و روش مبتنی بر الگوریتم مورچگان بهبوددهد.

واژه‌های کلیدی: SBRP، مسیریابی اتوبوس مدرسه، الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید.

۱. مقدمه

مسائل NP-Hard از طریق الگوریتم‌های فراابتکاری و یادگیری ماشین قابل‌حل هستند [۱-۵]. نمونه‌ای از این مسائل، مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه (SBRP[1]) است. هر روز مدرسه، صدها هزار دانش‌آموز کانادایی به مدارس خود منتقل‌می‌شوند. اتوبوس مدرسه خدمات حمل‌ونقل به‌موقع و پرهزینه را برای کودکان فراهم‌می‌کند. برای مثال، گروه حمل‌ونقل دانش‌آموزی تورنتو خدمات حمل‌ونقل را برای بیش از ۵۵۰۰۰ دانش‌آموز در بیش از ۸۰۰ مدرسه و مرکز در سراسر شهر تورنتو با تنها حدود ۱۸۰۰ اتوبوس مدرسه ارائه‌می‌دهد. با این حال، با بودجه محدود و کارکنان و اتوبوس‌های محدود، نمی‌توان مسیر اتوبوس مدرسه را از نظر هزینه، کارایی و ایمنی تضمین‌کرد. در نتیجه، مهم است که از فناوری برای ارائه راه‌حل‌های حمل‌ونقل مقرون‌به‌صرفه استفاده‌شود. مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه به‌عنوان مسیرهایی برای ناوگان اتوبوس مدرسه با ظرفیت‌های مشابه تعریف‌می‌شود. هدف این است که دانش‌آموزان را از ایستگاه‌های اتوبوس انتخابی انتخاب‌کرده و به مدرسه بیاورند. هدف این پروژه ارائه پیشنهادهای مسیریابی بر اساس دو الگوریتم مؤثر الهام گرفته‌شده از زیست برای اتوبوس‌های مدرسه یک مدرسه خاص است. درواقع، چالش‌هایی در مورد مسئله وجوددارد. به‌منظور کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، باید محدودیتی در تعداد اتوبوس‌ها وجودداشته‌باشد، به‌عنوان اندازه ناوگان. در عین حال، حداکثر استفاده از اتوبوس‌های مدرسه باید تضمین‌شود. در یک نکته مهم‌تر، ذی‌نفعان اتوبوس مدرسه باید مسئول تنظیم اقدامات ایمنی باشند. مسافت طی‌شده برای همه اتوبوس‌های مدرسه باید به حداقل برسد تا از مسیرهای مداری یا خطرناک جلوگیری‌شود. ایمنی در اتوبوس را نیز می‌توان با تعیین یک حد بالا برای زمان سواری دانش‌آموزان و همچنین میزان استفاده تضمین‌کرد [۶]؛ بنابراین می‌توان‌گفت استراتژی مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه به بهبود کارایی سیستم‌های اتوبوس مدرسه کمک‌می‌کند [۷].

مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه (SBRP) شامل تصمیمات مرتبطی مانند انتخاب ایستگاه‌های اتوبوس، تخصیص دانش‌آموزان به ایستگاه‌های اتوبوس انتخابی و طراحی مسیرهایی برای انتقال دانش‌آموزان به مدرسه با درنظرگرفتن محدودیت ظرفیت اتوبوس، با هدف حداقل سازی هزینه مسیرها است [۸]. در ادبیات، مسئله با استفاده از هر دو روش دقیق مانند برنامه‌نویسی عدد صحیح ترکیبی، اکتشافی و فراابتکاری موردبررسی قرارگرفته‌است. هدف بسیاری از این رویکردها حداقل‌سازی هزینه کل حمل‌ونقل است که می‌تواند شامل عواملی مانند کل مسافت طی‌شده با اتوبوس، تعداد کل اتوبوس‌های مورد نیاز و کل زمان انتظار برای دانش‌آموزان باشد.

در سال‌های اخیر، علاقه فزاینده‌ای به استفاده از فراابتکاری، مانند الگوریتم‌های ژنتیک و تبرید شبیه‌سازی‌شده، روش‌های یادگیری ماشین و ترکیب‌های آن‌ها، وجودداشته‌است [۹]. انعطاف‌پذیری فراابتکاری به آن‌ها این اجازه را می‌دهد که به‌عنوان ابزارهای مناسب، مسائل را بدون ایجاد بیشترین تغییرات در ساختار الگوریتم‌ها حل کنند. شایان‌ذکر است که برازندگی اول و دوم از این واقعیت ناشی‌می‌شود که فراابتکاری با پذیرفتن آن‌ها به‌عنوان جعبه سیاه، مسائل را حل‌می‌کند؛ زیرا آن‌ها فقط اطلاعاتی از پارامترهای ورودی و خروجی مسائل را درخواست‌می‌کنند. محاسبه مشتق فضای جستجوی مسائل موردتوجه الزامی نیست، زیرا فراابتکاری در خانواده‌ای از رویکردهای تصادفی قراردارد، جایی که آن‌ها ویژگی عملگرهای تصادفی را می‌گیرند. این ویژگی به‌طور گسترده مورد تأکید قرارگرفته‌است، جایی که آن‌ها موفقیت خود را در خروج از حداقل‌های محلی هنگام پرداختن به مسائل واقعی که اغلب دارای تعداد زیادی حداقل‌های محلی هستند، ثابت‌کرده‌اند. در نهایت، سادگی و سهولت استفاده، از دیگر مزایای مهم است؛ زیرا اکثر این روش‌ها از قوانین و رفتارهای ساده در گله‌ها یا گروه‌ها تقلیدمی‌کنند [۱۰].

در این مقاله، یک رویکرد جدید برای مسیریابی اتوبوس مدرسه با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید ارائه‌می‌شود. الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید ارائه‌شده دارای چندین مزیت برای مسائل بهینه‌سازی سراسری مانند انعطاف‌پذیری مورد انتظار آن برای مقابله با انواع مختلف مسائل بهینه‌سازی است که در آن بسیاری از انواع مسائل به درجه‌ای از انعطاف‌پذیری فراتر از آن چیزی که با الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید امکان‌پذیر است، نیاز دارند و تنها باید چند پارامتر تنظیم-شود که در ادامه این کار ارائه‌می‌شود. مدل ریاضی ارائه‌شده برای الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید، به انواع مختلفی از مسائل بهینه‌سازی مهندسی، به‌ویژه مسائلی با ابعاد بالا می‌پردازد. سادگی و استحکام الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید منجر به یافتن سریع و دقیق راه‌حل سراسری برای مسائل بهینه‌سازی با سرعت همگرایی بالا می‌شود که به‌عنوان مزیت سوم در نظر گرفته می‌شود. چهارمین مزیت الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید که باعث شده‌است در روش پیشنهادی از آن استفاده‌شود، این است که یک کاندید قوی در توسعه راه‌حل‌های کم‌هزینه و قدرتمند برای به چالش کشیدن مسائل بهینه‌سازی در دنیای واقعی است.

ساختار مقاله به این شرح است که در بخش دوم، روش‌های پیشین در زمینه مسیریابی اتوبوس مدرسه مرور می‌شوند. در بخش سوم، روش پیشنهادی بیان‌می‌شود. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار متلب تحلیل و مقایسه می‌شوند. در بخش پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادها بیان‌می‌شوند.

۲. پیشینه تحقیق

در [۱۱]، مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه را با استفاده از نظریه گراف بررسی‌کرده‌اند. هدف آن ایجاد الگوریتمی است که شامل روش‌های بهینه‌سازی مانند استفاده از الگوریتم Dijkstra و همچنین استفاده از یک تابع ریاضی خاص است که کوتاه‌ترین فاصله را از یک گره تا گره موجود بعدی جستجو می‌کند. با استفاده از روش‌های فوق، طراحی یک جدول زمانی مؤثر از یک ناوگان مشخص از اتوبوس‌های مدرسه با هدف

نهایی خروج دانش‌آموزان از منازل و تحویل آن‌ها به یک مکان خاص (نقطه ثابت) در مدرسه و در عین حال، غلبه بر موارد خاص مورد جستجو قرارخواهدگرفت. محدودیت‌ها و رعایت شرایط خاص در پژوهش حاضر اشاره‌ای کتابشناختی به نظریه گراف و مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه شده و می‌تواند به‌عنوان ابزار تکمیلی پایان‌نامه‌ها در آینده عمل‌کند. علاوه‌بر این، یک الگوریتم خاص برای حل مسئله فوق‌الذکر پیشنهادشده‌است. تمام محاسبات با استفاده از Python و Mathematica (نسخه ۱۲,۰) انجام‌خواهدشد. نتایج الگوریتم استخراج و به‌صورت علمی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار خواهدگرفت.

در [۱۲]، به‌دنبال تعیین کمیت تأثیر هزینه نهایی عوامل هزینه حمل‌ونقل بر کل هزینه عملیاتی مدارس دولتی تگزاس و تفاوت این هزینه‌ها بین نوع منطقه و محیط است. این تجزیه‌وتحلیل اعتبار یافته‌های پژوهشی اغلب مورد استناد را آزمایش‌می‌کند که مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه را مورد بررسی قرارمی‌دهد. نتایج حاصل از رگرسیون اثرات ثابت را برای کل هزینه عملیات حمل‌ونقل ارائه‌کرده‌اند. یافتن هزینه نهایی یک دانش‌آموز اضافی برای یک منطقه روستایی ۲,۵ برابر بیشتر از یک منطقه شهری است. علاوه بر این، میانگین‌های معیارهای حمل‌ونقل اتوبوس مدرسه را بین مناطق روستایی، شهر، حومه و شهر مقایسه‌کرده‌اند. مجموعه داده شامل یازده سال هزینه‌های عملیاتی حمل‌ونقل از ۹۹۸ منطقه مدرسه دولتی تگزاس است.

در [۱۳]، شکلی از SBRP را بررسی‌کرده‌اند. مسافران مسیر خود را از ایستگاه تا مقصد با یک جایگزین مانند پیاده‌روی ادامه‌می‌دهند. کارایی زمان اجرا مهم‌تر از بهینه‌بودن است. این نوع را به‌عنوان SBRP-RT، یک مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه با جنبه‌های معاوضه و الزامات بلادرنگ معرفی‌کرده‌اند. مدلی را با یک جستجوی محلی کارآمد برای چنین مسائلی پیشنهادنموده‌اند و کارایی آن را با آزمایش‌هایی بر روی مجموعه داده دنیای واقعی با حل سریع نشان‌داده‌اند.

در [۶]، مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه را به‌عنوان مسئله بهینه‌سازی چندهدفه فرموله کرده‌اند. برای حل این مسئله از طرح خوشه اول مسیر دوم، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک تطبیقی استفاده‌شده‌است. عملکرد این الگوریتم‌ها با استفاده از داده‌های واقعی مدارس دولتی در شهر وینچستر، ویرجینیا، ایالات‌متحده آمریکا ارزیابی‌می‌شود.

در [۸]، زمانی که واکنش دانش‌آموزان به انتخاب ایستگاه‌های اتوبوس درنظرگرفته‌می‌شود، به SBRP پرداخته‌اند، یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی با چندین دنبال‌کننده فرمول‌بندی می‌شود و تبدیل آن به یک مدل زمان‌بندی خطی عدد صحیح ترکیبی تک سطحی (MILP[۲]) پیشنهادشده‌است. اثربخشی الگوریتم پیشنهادی را از نظر کیفیت راه‌حل یافت‌شده و زمان محاسبات مورد نیاز نشان‌داده‌اند.

در [۱۴]، الگوریتم مسیریابی کارآمد را برای SBRP بررسی‌کرده‌اند. در این مقاله، الگوریتم مسیریابی شاخه و حد برای SBRP پیشنهاد شده‌است. برای گروهی از مدارس، راه‌حلی بهینه ارائه‌می‌کند که به مدارس کمک‌می‌کند تا مسیرهای اتوبوس، تعداد اتوبوس‌های مورد استفاده و در نتیجه بهینه‌سازی هزینه را بهینه کنند. این به کاهش آلودگی نیز کمک‌می‌کند؛ زیرا مسافت طی شده با اتوبوس‌ها بهینه شده‌است.

در [۱۵]، مسیریابی خط اتوبوس مدرسه WSB[۳] را برای بهره‌وری، سلامت و پیاده‌روی از طریق یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه بررسی‌کرده‌اند. یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای ایجاد مسیرهای WSB کارآمد با سه هدف که مزایای بالقوه WSB را نشان‌می‌دهند، پیشنهاد کرده‌اند: (۱) حداقل‌سازی زمان. (۲) برای حداقل‌سازی دوز آلاینده و (۳) برای حداکثرسازی قابلیت راه رفتن. مدل خود را برای مدرسه‌ای منتخب در برادفورد در بریتانیا اعمال‌نموده‌اند و سه خط WSB را به دنبال مسیرهای کارآمد ایجادکرده‌اند.

در [۱۶]، نزدیک شدن به جبهه پارتو را در یک مسئله طراحی مسیر اتوبوس با هزینه مسیریابی و مسافت پیاده‌روی افراد با استفاده از یک الگوریتم تکاملی جدید بررسی‌کرده‌اند. نوآوری‌های اصلی آن دوگانه است. اولین مورد، روشی است که کروموزوم‌ها در آن کدگذاری می‌شوند؛ زیرا آن‌ها فقط اطلاعاتی در مورد تعداد مسیرها و نقاط دریافت بازدید-شده ارائه‌می‌دهند. نوآوری دوم در روش ساخت یک راه‌حل عملی از کروموزوم است که شامل یک روش اکتشافی و چندین روش جستجوی محلی برای بهبود هر دو عملکرد هدف است. آزمایش‌های محاسباتی برای بررسی عملکرد الگوریتم از نظر کیفیت جلوی پارتو انجام‌می‌شود.

در [۱۷]، حل مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه را در مناطق روستایی بررسی کرده‌اند. حمل‌ونقل مدرسه برای تضمین دسترسی و ماندگاری دانش‌آموزان در مدارس دولتی، به‌ویژه در مناطق روستایی که دانش‌آموزان در مناطق وسیع با تراکم کم و جاده‌ها در شرایط ناامن هستند، ضروری است. آزمایش‌هی محاسباتی نشان‌می‌دهد که هنگام مقایسه نتایج روش با مسیرهای مورداستفاده در عمل، کاهش ۴۰,۵ درصدی در هزینه متوسط مسیرها و ۴۶,۰ درصدی در میانگین مسافت پیمود شده برای هر دانش‌آموز به‌دست‌می‌آید.

در [۱۸]، یک الگوریتم اکتشافی مسیریابی اتوبوس مدرسه ارائه-کرده‌اند که به ناوگان ناهمگن و انتخاب ایستگاه اتوبوس اجازه‌می‌دهد. مجموعه‌ای از ۲۰ نمونه مسئله در دنیای واقعی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم استفاده‌می‌شود. نتایج نشان‌می‌دهد که الگوریتم راه‌حل‌های با کیفیت بالا را در زمان محاسباتی بسیار کوتاه پیدامی‌کند.

در [۱۹]، در مورد مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه در هولینگول تحقیق کرده‌اند که در آن، دسترسی به مدارس و برابری طرح‌ها در نظر گرفته‌می‌شود. نتایج نشان‌می‌دهد که استفاده از استراتژی انتقال برای حل مسئله پیشنهادی می‌تواند تعداد اتوبوس‌های مدرسه مورد نیاز را کاهش‌دهد. زمان انحراف دانش‌آموزان برای تضمین عدالت طرح‌ها کاهش‌می‌یابد. یافته‌ها نشان‌می‌دهد که سیاست‌گذاران باید زمان طولانی انحراف دانش‌آموزان را در نظر بگیرند و طرح‌هایی را برای غلبه بر نابرابری مشاهده‌شده در شهرهای کوچک طراحی‌کنند.

در [۲۰]، از یک الگوریتم اکتشافی برای در نظرگرفتن مسئله برنامه‌ریزی مسیر اتوبوس چند مدرسه‌ای با ضریب ایمنی جاده استفاده‌شده‌است. با توجه به الزامات برنامه‌ریزی مسیر اتوبوس مدرسه، محدودیت‌هایی مانند ظرفیت اتوبوس مدرسه، ظرفیت ایستگاه و حداکثر زمان کار درنظرگرفته‌شده و ضریب ایمنی جاده یکپارچه شده‌است. در نهایت، ایمن‌ترین و بهینه‌ترین طرح مسیر از طریق الگوریتم مربوطه به‌دست‌می‌آید. این مقاله روش ساخت شاخص ایمنی راه را پیشنهادمی‌کند، آن را در موارد خاص اعمال‌می‌کند و یک الگوریتم اکتشافی مربوطه را برای حل مسئله پیشنهادمی‌کند. در نهایت، از مثال‌های عددی برای نشان‌دادن اثربخشی و برتری روش پیشنهادی استفاده‌می‌شود.

در [۲۱]، روش جدیدی برای حل مسئله مسیریابی اتوبوس ارائه‌کرده‌اند که در آن، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه به‌منظور رسیدگی به مسئله پیشنهادشده‌است. مهم‌ترین اهداف، کمینه کردن هزینه حمل‌ونقل و زمان سفر است. درنظرگرفتن تفکیک جنسیتی و ویژگی بار مختلط در مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه از نوآوری‌های اصلی و مهم این تحقیق به‌شمارمی‌رود.

در [۲۲]، مسیریابی و زمان‌بندی اتوبوس مدرسه را با زمان‌های سفر تصادفی وابسته به زمان با درنظرگرفتن قابلیت اطمینان ورود به‌موقع بررسی‌کرده‌اند. خطاهای تجمیع در مورد فقط تصادفی که به دلیل تجمیع تمام رکوردهای زمان سفر در یک توزیع احتمال واحد است، قابل‌توجه است و نباید از آن‌ها غافل‌شد. علاوه بر این، یک مثال دوم برای نشان‌دادن کاربرد روش پیشنهادی در موارد بزرگ حل شده‌است.

در [۲۳]، با کاهش تعداد اتوبوس‌ها، مسائلی مانند هزینه خرید اتوبوس، به‌کارگیری رانندگان و دستیاران آن‌ها، تعمیر و همچنین هزینه سوخت که باعث افزایش هزینه جهانی SBRP می‌شود، درنظرگرفته‌شده‌است. در پایان این بهینه‌سازی، با کاهش تعداد اتوبوس‌ها، معضل ترافیک، آلودگی هوا و صوتی به‌طور همزمان حل می‌شود و سیستم حمل‌ونقل و توزیع زیست‌محیطی تأمین‌می‌شود. در الگوریتم ژنتیک، با استفاده از دو نمونه شامل ناوگان ناهمگن و اعمال یک اپراتور تقاطع جدید، تعداد اتوبوس‌های استفاده‌شده و به‌تبع آن هزینه جهانی کاهش‌یافت.

در [۲۴]، یک راه‌حل مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی برای مسیریابی و زمان‌بندی اتوبوس مدرسه با پنجره زمانی پیشنهادشده‌است. نتیجه این تحقیق به مدیریت حمل‌ونقل کمک می‌کند تا کوتاه‌ترین و سریع‌ترین مسیر پویا را برای وسایل نقلیه طراحی‌کند. سیستم اطلاعات جغرافیایی به شناسایی ایستگاه‌ها در دنیای واقعی با توجه به تمرکز دانش‌آموزان در یک منطقه خاص و همچنین تجسم مسیر بهینه فعلی کمک‌می‌کند.

در [۲۵]، به بررسی مدل و الگوریتم مربوط به مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه پرداخته‌اند. یک مدرسه متوسطه در پکن انتخاب‌شده و مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته‌است. استراتژی مکان-تخصیص-مسیریابی برای تکمیل تجزیه‌وتحلیل پرسشنامه، تجزیه‌وتحلیل توزیع آدرس، انتخاب توقف‌ها و تولید مسیر استفاده‌شده‌است. سپس با الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان مسئله حل‌شده‌است.

در [۲۶]، الگوریتم کلونی مورچگان بهبودیافته برای حل مدل استفاده‌شده‌است و تأثیر عواملی مانند ترافیک واقعی جاده و کیفیت خدمات به‌طور کامل درنظرگرفته‌می‌شود. در نهایت، مدل با نتایج ماژول تحلیل شبکه در سیستم اطلاعات جغرافیایی مقایسه‌شده‌است. نتایج نشان‌می‌دهد که مدل می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی هزینه عملیاتی اتوبوس مدرسه را کاهش‌دهد، کیفیت خدمات اتوبوس مدرسه را بهبود بخشد.

در [۲۷]، الگوریتم مسیریابی اتوبوس مدرسه جدید توسعه‌یافته را معرفی‌کرده‌اند که برای درنظرگرفتن عوامل متعدد طراحی‌شده‌است. با متعادل‌کردن کارایی ناوگان اتوبوس در برابر ایمنی دانش‌آموزان و سیاست‌های مدرسه که به یادگیری دانش‌آموزان می‌پردازد، الگوریتم راه‌حل بهتری برای مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه ارائه‌کرده‌است.

در [۲۸]، به مرحله انتخاب ایستگاه اتوبوس برای مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه پرداخته‌اند. هدف این است که تعداد ایستگاه اتوبوس را به حداقل برسانند تا همه دانش‌آموزان را به یک ایستگاه اتوبوس با رعایت محدودیت فاصله راه‌رفتن از خانه تا ایستگاه اتوبوس اختصاص دهند. استراتژی ارائه‌شده تعداد زیادی از نقاط ایستگاه اتوبوس ممکن را در یک شبکه جاده‌ای ایجادمی‌کند. رویکرد بر روی داده‌های جغرافیایی واقعی یک شهر برزیل آزمایش‌شده و با روش‌شناسی متفاوت مقایسه‌شد.

در [۲۹]، یک رویکرد جدید برای حل SBRP پیشنهادکرده‌اند که در زمینه مسائل پویا استفاده‌می‌شود. آزمایش‌های عددی بر روی شبکه‌های مقیاس کوچک، مقیاس بزرگ و معیار برای ارزیابی عملکرد رویکرد و مقایسه آن با یک حل‌کننده SBRP در مقیاس بزرگ موجود بر اساس رویکرد فراابتکاری استفاده‌می‌شود.

در [۳۰]، یک الگوریتم ترکیبی را برای حل مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه ارائه‌کرده‌اند که در منطقه روستایی یک شهر برزیل اعمال‌شده‌است. از مجموعه کاملی از داده‌های جغرافیایی مرجع واقعی شامل ۷۱۶دانش‌آموز، ۲۳ مدرسه و شبکه جاده استفاده‌کرده‌اند. هدف، به حداقل رساندن کل مسافت طی‌شده یک ناوگان ناهمگن بوده‌است.

در [۳۱]، الگوریتم فراابتکاری را برای مسیریابی اتوبوس‌های مدرسه استفاده‌کرده‌اند. الگوریتم، یک چارچوب سفر را با سه اپراتور همسایگی، تعویض بین مسیرها و درج درون مسیر ترکیب‌می‌کند تا حل را به‌طور مکرر بهبود بخشد. نتایج پیاده‌سازی این الگوریتم نشان می‌دهد که الگوریتم برای SBRP بار مختلط امکان‌پذیر است. نتایج همچنین نشان‌می‌دهد که شاخص اتصال مکانی-زمانی مورد استفاده در الگوریتم می‌تواند زمان محاسبات مورد نیاز برای جستجوی راه‌حل‌ها را بدون تأثیر بر کیفیت راه‌حل‌ها کاهش‌دهد.

در [۳۲]، الگوریتم ژنتیک با اپراتور تقاطع قدرتمند جدید به نام EAX توسعه داده‌شده‌است تا بهترین و سریع‌ترین مسیر برای حل مسئله SBRP به‌دست‌آید. از مجموعه داده‌های معیار استاندارد SBRP در

فرآیند ارزیابی استفاده‌می‌شود. سیستم ارائه‌شده با چهار روش از ادبیات مقایسه‌شده‌است. این نتایج مقایسه‌ای نشان‌می‌دهد که روش ارائه‌شده از کل مجموعه روش‌های مقایسه‌ای بهتر عمل‌می‌کند.

در [۳۳]، بهینه‌سازی بلادرنگ مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه در شهرهای هوشمند را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و به‌دست‌آوردن مقادیر هزینه مربوطه در زمان واقعی انجام‌داده‌اند. نتایج تجربی نشان‌داد که الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک الگوریتم تکاملی می‌تواند راه‌حل‌های قابل قبولی برای مسائل مسیریابی اتوبوس‌های مدرسه ایجادکند.

جدول ۱: مرور روش‌های پیشین

مرجع	نویسنده	سال	هدف	الگوریتم
[۱۱]	Konstantinos	۲۰۲۳	مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه را با استفاده از نظریه گراف بررسی-کرده‌اند.	الگوریتم Dijkstra
[۱۲]	Ellegood	۲۰۲۴	به‌دنبال تعیین کمیت تأثیر هزینه نهایی عوامل هزینه حمل‌ونقل بر کل هزینه عملیاتی مدارس دولتی تگزاس و تفاوت این هزینه‌ها بین نوع منطقه و محیط است.	رگرسیون
[۱۳]	Effendy	۲۰۲۳	شکلی از SBRP را بررسی‌کرده‌اند. مسافران مسیر خود را از ایستگاه تا مقصد با یک حالت جایگزین مانند پیاده‌روی ادامه‌می‌دهند.	SBRP-RT
[۶]	Xue	۲۰۲۳	مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه را به‌عنوان مسئله بهینه‌سازی چندهدفه فرموله کرده‌اند.	الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک تطبیقی
[۸]	Calvete	۲۰۲۳	یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی با چندین دنبال‌کننده فرمول‌بندی می‌شود و تبدیل آن به یک مدل زمان‌بندی خطی عدد صحیح ترکیبی تک سطحی (MILP) پیشنهاد شده-است	^{۲}MILP
[۱۴]	Kumar	۲۰۱۵	الگوریتم مسیریابی کارآمد را برای SBRP بررسی‌کرده‌اند.	الگوریتم مسیریابی شاخه و حد
مرجع	**نویسنده**	**سال**	**هدف**	**الگوریتم**
[۱۵]	Wang	۲۰۲۳	مسیریابی خط اتوبوس مدرسه WSB را برای بهره‌وری، سلامت و پیاده‌روی از طریق یک	یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه
			رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه بررسی-کرده‌اند.	
[۱۶]	Calvete	۲۰۲۲	نزدیک‌شدن به جبهه پارتو را در یک مسئله طراحی مسیر اتوبوس با هزینه مسیریابی و مسافت پیاده‌روی افراد با استفاده از یک الگوریتم تکاملی جدید بررسی-کرده‌اند.	یک الگوریتم تکاملی جدید
[۱۷]	Caldas	۲۰۲۲	حل مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه را در مناطق روستایی بررسی-کرده‌اند.	الگوریتم جدید مسیریابی
[۱۸]	Sciortino	۲۰۲۲	یک الگوریتم اکتشافی مسیریابی اتوبوس مدرسه ارائه‌کرده‌اند که به ناوگان ناهمگن و انتخاب ایستگاه اتوبوس اجازه‌می‌دهد.	یک الگوریتم اکتشافی
[۱۹]	Liu	۲۰۲۲	در مورد مسیریابی اتوبوس مدرسه در هولینگول تحقیق نموده‌اند که در آن، دسترسی به مدارس و برابری طرح‌ها درنظرگرفته‌می‌شود.	الگوریتم جدید مسیریابی
[۲۰]	Botian	۲۰۲۲	یک الگوریتم اکتشافی برای در نظرگرفتن مسئله برنامه‌ریزی مسیر اتوبوس چند مدرسه‌ای با ضریب ایمنی جاده استفاده‌شد.	یک الگوریتم اکتشافی
[۲۱]	Rashidi Komijan	۲۰۲۱	یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای مسیریابی اتوبوس پیشنهاد شده‌است.	مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه
مرجع	نویسنده	سال	هدف	الگوریتم
[۲۲]	Babaei	۲۰۱۹	مسیریابی و زمان‌بندی اتوبوس مدرسه را با زمان‌های سفر تصادفی وابسته به زمان با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ورود بررسی‌کرده‌اند.	الگوریتم جدید مسیریابی
[۲۳]	Ümit	۲۰۱۹	مسائلی مانند هزینه خرید اتوبوس، به‌کارگیری رانندگان و دستیاران آن‌ها، تعمیر و همچنین هزینه سوخت که باعث افزایش هزینه	الگوریتم ژنتیک

			جهانی SBRP می‌شود، در نظر گرفته شده‌است.	
[۲۴]	Hashi	۲۰۱۶	مسیریابی و زمان‌بندی اتوبوس مدرسه را با پنجره زمانی پیشنهاد کرده‌اند.	یک راه‌حل مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی
[۲۵]	Huo	۲۰۱۴	به بررسی مدل و الگوریتم مربوط به مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه پرداخته‌اند. یک مدرسه متوسطه در پکن انتخاب‌شده و مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته‌است.	بهینه‌سازی کلونی مورچگان
[۲۶]	Han	۲۰۱۹	الگوریتم کلونی مورچگان بهبودیافته برای حل مدل استفاده شده است و تأثیر عواملی مانند ترافیک واقعی جاده و کیفیت خدمات به‌طور کامل درنظرگرفته‌می‌شود.	الگوریتم کلونی مورچگان بهبودیافته
[۲۷]	Wang	۲۰۱۷	الگوریتم مسیریابی اتوبوس مدرسه جدید پ را معرفی‌کرده‌اند که برای در نظر گرفتن عوامل متعدد طراحی‌شده‌است.	الگوریتم جدید مسیریابی
مرجع	**نویسنده**	**سال**	**هدف**	**الگوریتم**
[۲۸]	Sarubbi	۲۰۱۶	به مرحله انتخاب ایستگاه اتوبوس برای مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه پرداخته‌اند.	الگوریتم جدید مسیریابی
[۲۹]	Guo	۲۰۱۸	یک رویکرد جدید برای حل SBRP پیشنهادکرده‌اند که در زمینه مسائل پویا استفاده‌می‌شود.	رویکرد فراابتکاری
[۳۰]	Silva	۲۰۱۵	یک الگوریتم ترکیبی را برای حل مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه ارائه‌کرده‌اند که در منطقه روستایی یک شهر برزیل اعمال شده‌است.	الگوریتم ترکیبی
[۳۱]	Hou	۲۰۲۰	الگوریتم فراابتکاری را برای مسیریابی اتوبوس‌های مدرسه استفاده-کرده‌اند.	الگوریتم فراابتکاری
[۳۲]	Ra'ed	۲۰۱۷	الگوریتم ژنتیک با اپراتور تقاطع قدرتمند جدید به نام EAX توسعه داده‌شده‌است تا بهترین و سریع‌ترین مسیر برای حل مسئله SBRP به دست آید.	الگوریتم ژنتیک
[۳۳]	Ozmen	۲۰۲۱	بهینه‌سازی بلادرنگ مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه در شهرهای هوشمند را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و به دست آوردن مقادیر هزینه مربوطه در زمان واقعی انجام‌داده‌اند.	الگوریتم ژنتیک

در پژوهش‌های صورت‌گرفته، مسیریابی اتوبوس مدرسه به‌طور گسترده مطالعه‌شد. به‌منظور حل مسیریابی اتوبوس مدرسه، دو استراتژی مهم وجوددارد که شامل استراتژی سنتی و استراتژی بار مختلط هستند. در استراتژی سنتی، دانش‌آموزانی که در یک مدرسه مشغول تحصیل هستند به همان اتوبوس مدرسه اختصاص‌می‌یابند. در استراتژی بار مختلط، به دانش‌آموزان با مقصدهای مدارس مختلف با یک اتوبوس خدمات‌رسانی می‌شود. با این حال، ادبیات موجود بیشتر بر روی مسیریابی اتوبوس مدرسه در شهرهای بزرگ متمرکز شده‌است. در شهرهای کوچک، جایگاه اصلی دانش‌آموزان ویژه که سرویس‌دهی آن‌ها باید با شرایط خاصی صورت‌پذیرد (پیاده و سوار کردن در محل منزل) پراکنده است و تعداد اتوبوس‌های مدرسه محدود هستند که با ویژگی‌های مسیریابی اتوبوس مدرسه در شهرهای بزرگ، متفاوت است. بنابراین، استفاده مستقیم استراتژی مرسوم یا استراتژی بار ترکیبی برای ارائه خدمات با کیفیت بالا برای دانش‌آموزان در شهرهای کوچک، بسیار سخت است.

در روش‌های پیشین به مواردی مانند مسافت طی‌شده توسط خودروهای سرویس مدارس به‌عنوان مسیر حرکت وسایل نقلیه، تعداد دانش‌آموزان، مجموعه خودروهای مورداستفاده به‌عنوان سرویس، زمان رفت‌وآمد دانش‌آموز، زمان رفت‌وآمد مستقیم دانش‌آموز بدون انحراف و تغییر مسیر جهت سوار نمودن دانش‌آموزان دیگر، طول مسیر طی‌شده از طریق خودرو و میزان ازدحام پیش‌بینی‌شده برای ایستگاه سوارشدن دانش‌آموز درنظرگرفته‌نشده‌اند. برای رفع چالش روش‌های پیشین، در تابع هدف مواردی مانند مسافت طی‌شده، مصرف سوخت در هر کیلومتر و هزینه استهلاک خودرو در واحد جابجایی، فاصله خانه تا مدرسه دانش‌آموز در نظرگرفته‌می‌شوند.

۳. روش پیشنهادی

در این بخش، گام‌های روش پیشنهادی مطرح‌می‌گردند. مفروضات اصلی زیر در نظر گرفته‌می‌شود:

همه اتوبوس‌های مدرسه از مدرسه حرکت‌می‌کنند و دانش‌آموزان را به مدرسه منتقل‌می‌کنند. مختصات مدرسه و توقف‌ها و تعداد دانش‌آموزان رفت‌وآمد در هر ایستگاه مشخص‌می‌شود. همه اتوبوس‌های مدرسه ظرفیت یکسانی دارند (ناوگان همگن). هر اتوبوس مدرسه، بار اضافی ندارد. زمان انتظار در هر توقف نادیده‌گرفته‌می‌شود. هر ایستگاه فقط یک بار بازدیدمی‌شود. مسیر تنها زمانی شروع‌می‌شود که اتوبوس‌ها به اولین ایستگاه مربوطه خود می‌رسند و زمانی که در نهایت به مدرسه می‌رسند به پایان می‌رسد. همه اتوبوس‌ها با سرعت یکسان حرکت-می‌کنند. تعداد دانش‌آموزان بیش از ظرفیت یک اتوبوس است.

۳-۱. ثبت مکان مدارس و منازل دانش‌آموزان

در ابتدا ثبت مکان مدارس و منازل دانش‌آموزان روی ناحیه تحت سرویس‌دهی به‌عنوان ایستگاه‌های سرویس (گره‌های شبکه) انجام-می‌شود. محیط استقرار شبکه از لحاظ میزان درخواست و حضور دانش‌آموزان، دارای توزیع یکسانی نیست. الگوی ترافیکی در محیط دریافت سرویس از طریق دانش‌آموزان در یک هفته گذشته به‌عنوان شاخص ازدحام معین شده‌است. ایستگاه‌هایی که دارای ازدحام ترافیکی بالایی هستند، به‌عنوان نقاط پرتردد لحاظ‌می‌گردند. ازآنجاکه انتساب ترافیک به مسیر، دارای پیچیدگی بالایی در مدل است؛ ایستگاه‌های سوارشدن دانش‌آموزان لحاظ‌می‌گردند و میزان ترافیک در هر ایستگاه ثبت خواهدشد تا در ادامه به‌عنوان یک ضریب وزنی در طول مسیر ضرب گردد و زمان طی مسیر در دنیای واقعی را مشخص‌کند.

۳-۲. بهترین مسیر سرویس‌های مدارس از طریق الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید

در این بخش، مدل ریاضی الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید ارائه‌شده که برای توصیف رفتار کوسه‌های سفید در هنگام جستجوی غذا ایجادشده‌اند، به عبارت دیگر روال حل تابع هدف توضیح‌داده‌می‌شود.

1: *Initializ the parameters of the problem*
2: *Initializ the parameters of WSO*
3: *Randomly generate the Initial positions of WSO*
4: *Initializ the velocity of the initial population*
5: *Evaluate the position of the initial population*
6: ***while*** $(k < K)$***do***
7: *Update the parameters* $v, p_1, p_2, \mu, a, b, w_o, f,$ mv *and* S_s *using Eqs.* (6), (7), (8), (9), (11), (12), (13), (14), (15) *and* (18), *respectively*
8: ***for*** $i = 1$ *to* n ***do***
9: $$v_{k+1}^{i} = \mu\left[v_k^i + p_1\left(w_{gbest_k} - w_k^i\right) \times c_1 + p_2\left(w_{best}^{v^i{}_k} - w_k^i\right) \times c_2\right]$$
10: ***end for***
11: ***for*** $i = 1$ *to* n ***do***
12: ***if*** $rand < mv$ ***then***
13: $w_{k+1}^i = w_k^i . \neg \oplus w_o + \mu . a + l . b$
14: ***else***
15: $w_{k+1}^i = w_k^i + v_k^i / f$
16: ***end if***
17: ***end for***
18: ***for*** $i = 1$ *to* n ***do***
19: ***if*** $rand \le S_s$ ***then***
20: $\vec{D}_w = \left|rand \times \left(w_{gbest_k} - w_k^i\right)\right|$
21: ***if*** $i == 1$ ***then***
22: $w_{k+1}^i = w_{gbest_k} + r_1 \vec{D}_w sgn(r_2 - 0.5)$
23: ***else***
24: $\acute{w}_{k+1}^i = w_{gbest_k} + r_1 \vec{D}_w sgn(r_2 - 0.5)$
25: $w_{k+1}^i = \frac{w_k^i + \acute{w}_{k+1}^i}{2 \times rand}$
26: ***end if***
27: ***end if***
28: ***end for***
29: *Adjust the position of the white sharks that proceed beyond the boundary*
30: *Evaluate and update the new positions*
31: $k = k + 1$
32: ***end while***
33: *Return the optimal solution obtained so far*

شکل ۱. شبه کد فرآیند الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید برای حل تابع هدف پیشنهادی

گام اول: مقداردهی اولیه الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید

سرعت موج کوسه‌های سفید بزرگ را می‌توان با رابطه (۱) توصیف کرد:

$$v = xf \qquad (۱)$$

جایی که v سرعت حرکت موج‌دار است، x طول موجی است که مسافتی را که یک کوسه سفید در یک حرکت مواج طی‌می‌کند تا یک دور کامل شود را مشخص‌می‌کند و f نشان‌دهنده فرکانس حرکت موج‌داری است که با تعداد دورها تعیین‌می‌شود (یعنی چرخه‌هایی که کوسه سفید در هر ثانیه کامل‌می‌کند، که در آن چرخه در ثانیه به‌عنوان هرتز (Hz) شناخته‌می‌شود).

کوسه‌های سفید بزرگ از هر منطقه ممکن در حوزه فضایی برای شناسایی طعمه با استفاده از حس بویایی استثنایی خود بهره‌برداری-می‌کنند. هنگامی که یک کوسه سفید به طعمه خود نزدیک می‌شود، حس بویایی آن شروع به عمل‌می‌کند. قابل‌توجه است که وقتی کوسه‌های سفید بزرگ به طعمه خود نزدیک می‌شوند، حس بویایی آن‌ها می‌تواند به‌صورت تصاعدی رشدکند تا زمانی که موقعیت احتمالی طعمه را دقیقاً مشخص‌کنند. برای به‌روزرسانی موقعیت کوسه‌های سفید هنگام حرکت به سمت طعمه، می‌توان از رابطه حرکت با شتاب ثابت (۲) استفاده‌کرد:

$$x = x_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} a (\Delta t)^2 \qquad (۲)$$

که در آن x موقعیت جدید کوسه سفید را نشان‌می‌دهد، x_i موقعیت اولیه کوسه سفید است، با توجه به سرعت اولیه کوسه سفید، Δt نشان‌دهنده فاصله زمانی بین موقعیت اولیه و فعلی و a ضریب شتاب است که ثابت است. در بسیاری از موارد، طعمه‌هایی مانند فوک‌ها پس از ترک محل خود، بوی خود را باقی‌می‌گذارند، بنابراین کوسه‌های سفید بزرگ وقتی به آن بو نزدیک می‌شوند، طعمه‌ای در آنجا پیدانمی‌کنند.

در این حالت، آن‌ها باید به‌طور تصادفی در مکان‌های نزدیک جستجوکنند و با استفاده از حواس فعال بینایی، شنوایی و بویایی خود، به‌طور تصادفی مناطق دیگر را در فضای جستجو کاوش‌کنند. در این کار، تصویر کلی از رفتار شکار کوسه‌های سفید بزرگ و روش‌های مؤثر آن‌ها برای دنبال‌کردن و شکار طعمه، ما را به مدل‌های ریاضی تکامل‌یافته برای الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید و بهینه‌سازی هدایت‌کرده‌است.

ازآنجاکه الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است، با ایجاد تصادفی مجموعه‌ای از راه‌حل‌های اولیه هنگام شروع فرآیند بهینه‌سازی مورد استفاده برای حل یک مسئله بهینه‌سازی شروع‌می‌شود. جمعیت n کوسه سفید (به‌عنوان مثال، اندازه جمعیت)، در یک فضای جستجوی بعدی (یعنی بعد مسئله)، با موقعیت هر کوسه سفید، نشان‌می‌دهد که یک راه‌حل کاندید برای یک مسئله را می‌توان در یک ماتریس دو بعدی به شرح رابطه (۳) توصیف‌کرد:

$$w = \begin{bmatrix} w_1^1 & w_2^1 & \cdots & \cdots & w_d^1 \\ w_1^2 & w_2^2 & \cdots & \cdots & w_d^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_1^n & w_2^n & \cdots & \cdots & w_d^n \end{bmatrix} \quad (۳)$$

w موقعیت همه کوسه‌های سفید در فضای جستجو است، d نشان‌دهنده تعداد متغیرهای تصمیم برای یک مسئله معین است و w_d^i نشان‌دهنده محل کوسه سفید در بعد dام است. جمعیت اولیه در دامنه جستجو با مقداردهی اولیه تصادفی یکنواخت[۴] به شرح رابطه (۴) ایجادمی‌شود:

$$w_j^i = l_j + r \times (u_j - l_j) \quad (۴)$$

که در آن w_j^i بردار اولیه کوسه سفید در بعد j ام، u_j و l_j به ترتیب کران بالا و پایین فضای جستجو را در بعد j ام نشان‌می‌دهند و r یک عدد تصادفی ایجادشده در بازه [۰, ۱] است. کیفیت هر راه‌حل کاندید برای هر مکان جدید یک کوسه سفید بر اساس یک تابع تناسب تعریف‌شده برای آن هدف ارزیابی‌می‌شود. سپس اگر موقعیت جدید بهتر از موقعیت فعلی باشد، موقعیت فعلی بازسازی‌می‌شود. در شبیه‌سازی الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید، کوسه سفید در موقعیت خود باقی می‌ماند، اگر بهتر از موقعیت جدید باشد.

گام دوم: سرعت حرکت به سمت طعمه

ازآنجاکه کوسه‌های سفید موجوداتی با تمایل به بقا هستند، بیشتر وقت خود را صرف شکار و ردیابی طعمه می‌کنند. معمولاً از هر روشی برای تعقیب طعمه با استفاده از حواس خارق‌العاده خود مانند شنوایی، بینایی و بویایی استفاده‌می‌کنند. هنگامی که یک کوسه سفید بر اساس امواجی که هنگام حرکت شکار می‌شنود، مکان یک طعمه را درک می‌کند، با یک حرکت موج‌دار به سمت طعمه حرکت‌می‌کند که می‌تواند همان‌طور که در رابطه (۵) نشان داده شده‌است، تعریف‌شود.

$$v_{k+1}^i = \mu \left[v_k^i + p_1 \left(w_{gbest_k} - w_k^i \right) \times c_1 + p_2 \left(w_{best}^{v^i k} - w_k^i \right) \times c_2 \right] \quad (۵)$$

جایی که $i = 1,2, \ldots, n$، شاخص کوسه سفید برای جمعیتی با اندازه n است، v_{k+1}^i نشان‌دهنده بردار سرعت جدید کوسه سفید در مرحله $(k+1)$ است، v_k^i بردار سرعت فعلی iامین کوسه سفید را در مرحله k ام تعریف‌می‌کند. w_{gbest_k} نشان‌دهنده بردار بهترین موقعیت سراسری است که تاکنون توسط هر کوسه سفید در تکرار k ام به‌دست‌آمده است. w_k^i، بردار موقعیت فعلی iامین کوسه سفید در مرحله kام است، $w_{best}^{v_k^i}$، بهترین بردار موقعیت شناخته‌شده iام است که برای ازدحام شناخته‌شده‌است و v^i بردار شاخص iامین کوسه سفید است که به بهترین موقعیت تعریف‌شده همان‌طور که در رابطه (۶) نشان داده شده است، دست می‌یابد. c_1 و c_2 دو عدد تصادفی یکنواخت در محدوده [۰، ۱] هستند، p_1 و p_2 نیروهای کوسه‌های سفید را نشان‌می‌دهند که به ترتیب تأثیر w_{gbest_k} و $w_{best}^{v_k^i}$ را در w_k^i کنترل‌می‌کنند که به‌ترتیب در رابطه‌های (۷) و (۸) محاسبه‌شده‌اند. μ نشان‌دهنده عامل ترکیب ارائه‌شده در الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید برای تجزیه‌وتحلیل رفتار همگرایی کوسه‌های سفید است که در رابطه (۹) تعریف‌شده‌است.

$$v = \lfloor n \times rand(1,n) \rfloor + 1 \quad (۶)$$

$rand(1,n)$ بردار اعداد تصادفی تولیدشده با توزیع یکنواخت در محدوده [۰، ۱] است. k و K به‌ترتیب تعداد فعلی و حداکثر تعداد تکرارها هستند، p_{min} و p_{max} نشان‌دهنده سرعت‌های اولیه و ثانویه برای دستیابی به حرکت مطلوب برای کوسه‌های سفید هستند. p_{min} و p_{max} پس از تجزیه‌وتحلیل دقیق به‌ترتیب ۰,۵ و ۱,۵ یافت‌شد.

$$p_1 = p_{max} + (p_{max} - p_{min}) \times e^{-(4k/K)^2} \quad (۷)$$

$$p_2 = p_{min} + (p_{max} - p_{min}) \times e^{-(4k/K)^2} \quad (۸)$$

گام سوم: حرکت به سمت طعمه بهینه

کوسه‌های سفید بزرگ بیشتر وقت خود را صرف جستجوی طعمه‌های بالقوه می‌کنند، جایی که می‌توان طعمه بهینه یا غیربهینه را پیداکرد. بر این اساس، موقعیت کوسه‌های سفید دائماً در حال تغییر است. آن‌ها معمولاً با شنیدن امواج ناشی از حرکت طعمه یا استشمام بوی طعمه به سمت طعمه حرکت‌می‌کنند. در برخی موارد، طعمه محل خود را ترک-می‌کند یا به‌دلیل حرکت کوسه سفید به سمت آن یا برای جستجوی غذا. اغلب، طعمه بوی خود را در آن موقعیت، جایی که کوسه سفید می‌تواند طعمه را استشمام‌کند، باقی‌می‌گذارد. در این مورد، کوسه سفید در مکان‌های تصادفی در جستجوی طعمه حرکت می‌کند که رفتار گروه ماهیان به‌دنبال منبع غذایی است. در این زمینه، استراتژی به‌روزرسانی موقعیت تعریف‌شده در رابطه (۱۰) برای توصیف رفتار کوسه‌های سفید هنگام حرکت به سمت طعمه استفاده شد.

$$w_{k+1}^i = \begin{cases} w_k^i . \neg \oplus w_o + \mu . a + l . b/; rand < mv \\ w_k^i + v_k^i/f; rand \geq mv \end{cases} \quad (۱۰)$$

جایی که w_{k+1}^i به بردار موقعیت جدید کوسه سفید در مرحله تکرار $(k+1)$ اشاره‌دارد، $\neg$، یک عملگر نفی است، a و b بردارهای باینری یک بعدی هستند که با رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) تعریف‌شده‌اند. l و u به‌ترتیب نشان‌دهنده کران پایین و بالای فضای جستجو هستند، w_o نشان‌دهنده یک بردار منطقی است که در رابطه (۱۳) نشان داده شده است، f نشان‌دهنده بسامد حرکت موج دار یک کوسه سفید است که در رابطه (۱۴) ارائه‌شده‌است. $rand$ یک عدد تصادفی ایجادشده در محدوده ۰ تا ۱ را تعریف‌می‌کند و mv نشان‌دهنده نیروی حرکتی است

که با تعداد دفعات تکرار افزایش‌می‌یابد، همان‌طور که کوسه سفید به طعمه نزدیک می‌شود، که در رابطه (۱۵) تعریف‌شده‌است.

$$a = sgn(w_k^i - u) > 0 \quad (۱۱)$$

$$b = sgn(w_k^i - l) < 0 \quad (۱۲)$$

$$w_o = \oplus (a, b) \quad (۱۳)$$

که در آن $\oplus$ یک عملیات xor بیتی است. رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) برای پشتیبانی از راه‌حل‌هایی برای رفتار خودسرانه در فضای جستجو مهم هستند و برای کمک به کوسه‌های سفید برای کشف تمام مناطق بالقوه فضای جستجو ضروری هستند. که در آن f_{min} و f_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر فرکانس حرکت مواج را نشان‌می‌دهند و $rand$ یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده [۰، ۱] است. مقادیر f_{min} و f_{max} برای مسائل مورد بررسی در این کار به‌ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۷۵ است. این مقادیر پس از تجزیه‌وتحلیل دقیق انتخاب‌شدند و برای طیف وسیعی از مسائل مورد آزمایش قرارگرفتند، اما می‌توانند به‌خوبی برای سایر مسائل در صورت لزوم تطبیق‌داده‌شوند.

$$f = f_{min} + \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{max} + f_{min}} \quad (۱۴)$$

$$mv = \frac{1}{(a_0 + e^{(K/2-k)/a_1})} \quad (۱۵)$$

که در آن a_0 و a_1 دو ثابت مثبت هستند که برای مدیریت رفتارهای اکتشاف و بهره‌برداری استفاده‌می‌شوند. پارامتر mv برای بیان قدرت حس شنوایی و بویایی کوسه سفید پیشنهادشد که به‌عنوان تابعی از تکرارها افزایش‌می‌یابد. مقادیر کوچک mv باعث جستجوی محلی (در مجاورت w_{k+1}^i) می‌شود که باعث‌می‌شود کوسه‌های سفید در مناطق کوچک‌تر جستجوکنند. مقادیر بزرگ mv منجر به جستجوی سراسری می‌شود (به دور از w_{k+1}^i)، که کوسه‌های سفید را ترغیب به جستجو در مناطق بزرگ‌تر و دورتر در فضای جستجومی‌کنند. اساساً، این پارامتر برای افزایش امکان دستیابی به تعادل مناسب بین اکتشاف و بهره‌برداری، مهم است. پارامتر mv در رابطه (۱۵) به‌عنوان تابعی از زمان برای اطمینان از همگرایی با افزایش سرعت جستجو و همچنین تقویت ویژگی‌های اکتشاف و بهره‌برداری از الگوریتم ارائه‌شده پیشنهاد شد. از دیدگاه ریاضی، مقادیر زیاد mv، مانع جستجوی بیشتر می‌شود و مقادیر کوچک mv شدت جستجو را در فضای جستجو تقویت‌می‌کند. از این رو، مقادیر mv می‌تواند شدت جستجوی کوسه‌های سفید را برای مکان‌یابی مؤثر طعمه کنترل‌کند. بنابراین، یافتن مقادیر مناسب ضرایب a_0 و a_1 برای تابع mv ضروری است. مقادیر آن‌ها برای تمام مسائل، به ترتیب ۶/۲۵ و ۱۰۰ است. آن‌ها پس از تجزیه‌وتحلیل عمیق و آزمایش‌های تجربی گسترده بر روی تعداد زیادی از مسائل بهینه‌سازی به‌دست‌آمدند. بخش اول رابطه (۱۰)، دقیقاً زمانی که $rand < mv$ است، توصیف‌می‌کند که کوسه‌های سفید به‌طور تصادفی موقعیت خود را در اطراف طعمه (یعنی منبع غذا) در یک فضای جستجوی معین به‌روز می‌کنند. این به‌ویژه زمانی انجام‌می‌شود که یک طعمه محل را ترک‌کند و بوی خود را در آن مکان باقی‌می‌گذارد و سپس کوسه سفید به‌طور تصادفی بوی اطراف طعمه را دنبال‌کند. به این ترتیب، کوسه‌های سفید می‌توانند از حس خوب شنوایی و بویایی خود برای بهره‌برداری از هر ناحیه از این فضای جستجو استفاده‌کنند. این بخش عمدتاً نشان‌می‌دهد که کوسه‌های سفید به‌طور تصادفی موقعیت خود را در جهات و مناطق مختلف در حین شکار طعمه بهینه تغییرمی‌دهند. قسمت دوم رابطه (۱۰) بر اساس رابطه دوم حرکت با شتاب ثابت به این صورت بیان‌می‌شود. این رابطه تقریباً شبیه رابطه (۲) است. با این حال، زمان از این رابطه حذف‌شد، زیرا زمان، تکرار در مسائل بهینه‌سازی است، که در آن اختلاف بین تکرارها همیشه برابر با ۱ است. این تا حدی شبیه‌سازی‌می‌کند که کوسه‌های سفید معمولاً به سمت طعمه حرکت‌می‌کنند، به‌ویژه زمانی که امواج ناشی از حرکت طعمه را می‌شنوند. این مورد زمانی شبیه‌سازی‌می‌شود که $rand \geq mv$ باشد. عمدتاً نشان‌می‌دهد که کوسه‌های سفید می‌توانند موقعیت خود را در فضای جستجو بر اساس گوش‌کردن به طعمه به‌روز کنند.

گام چهارم: حرکت به سمت بهترین کوسه سفید

کوسه‌های سفید بزرگ می‌توانند موقعیت خود را نسبت به بهترین کوسه نزدیک به طعمه حفظ‌کنند. این رفتار طبق رابطه (۱۶) ، فرموله شده‌است.

$$\acute{w}_{k+1}^i = w_{gbest_k} + r_1 \vec{D}_w sgn(r_2 - 0.5) \quad r_3 < s_s \quad (۱۶)$$

در جایی که $\acute{w}_{k+1}^i$ موقعیت به‌روز شده کوسه سفید با توجه به‌موقعیت طعمه است، $sgn(r_2 - 0.5)$ برای تغییر جهت جستجو ۱ یا −۱ می‌دهد، متغیرهای r_1، r_2 و r_3 اعداد تصادفی که در محدوده [۰، ۱] قرار دارند، $\vec{D}_w$ فاصله بین طعمه (یعنی منبع غذا) و کوسه سفید است (رابطه ۱۷) و s_s، پارامتری است که برای بیان قدرت حس بویایی و بینایی کوسه‌های سفید زمانی که کوسه‌های سفید دیگری را دنبال‌می‌کنند که نزدیک به طعمه بهینه هستند، پیشنهاد شده‌است (رابطه ۱۸) که در آن $rand$، یک عدد تصادفی در محدوده [۰، ۱] است و w_k^i موقعیت فعلی کوسه سفید نسبت به w_{gbest_k} است. که در آن a_2 یک ثابت مثبت است که برای کنترل رفتار اکتشاف و بهره‌برداری استفاده‌می‌شود. مقدار a_2، ۰,۰۰۰۵ است.

$$\vec{D}_w = |rand \times (w_{gbest_k} - w_k^i)| \quad (۱۷)$$

$$s_s = |1 - e^{(-a_2 \times k/K)}| \quad (۱۸)$$

گام پنجم: رفتار گروه انواع ماهیان

به‌منظور شبیه‌سازی ریاضی رفتار گروه کوسه‌های سفید، دو راه‌حل بهینه اول حفظ شد و موقعیت سایر کوسه‌های سفید مطابق با این موقعیت‌های بهینه به‌روزرسانی شد. رابطه (۱۹) برای تعریف رفتار گروه انواع ماهیان برای کوسه‌های سفید پیشنهاد شده‌است:

$$w_{k+1}^i = \frac{w_k^i + \acute{w}_{k+1}^i}{2 \times rand} \quad (۱۹)$$

که در آن $rand$ یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده [۰، ۱] است. رابطه (۱۸) نشان‌می‌دهد که کوسه‌های سفید می‌توانند موقعیت خود را مطابق با موقعیت بهترین کوسه سفید (بهترین موقعیت که بسیار نزدیک به طعمه است)، به‌روز کنند. موقعیت نهایی کوسه‌های سفید بزرگ (یعنی عوامل جستجو) جایی در فضای جستجو است که بسیار

نزدیک به طعمه بهینه است. رفتار گروه انواع ماهیان و حرکت کوسه‌های سفید به سمت بهترین کوسه سفید، رفتار جمعی الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید را مشخص‌می‌کند و این زمینه را برای ویژگی‌های اکتشاف و بهره‌برداری بهتر افزایش‌می‌دهد.

۳-۳. تابع هدف

تابع برازندگی جدیدی توسط عملگرهای الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید به‌کارمی‌رود که میزان مناسب بودن هر راه‌حل را تعیین‌می‌نماید. در تابع برازش، پارامترهای مجموع فواصل حرکت سرویس‌های مدارس و میانگین زمان رفت‌وآمد دانش‌آموزان، میانگین زمان انحراف دانش‌آموزان (مدت‌زمان تلف‌شده جهت خروج از مسیر مستقیم)، هزینه سفر و بهره‌وری منابع حمل‌ونقل لحاظ‌می‌شوند. با توجه به مطالب مطرح‌شده، تابع برازش در روش پیشنهادی به‌صورت رابطه‌های (۲۰) تا (۲۳) تا تعریف‌می‌گردد که تلاش شده است مقدار آن، بیشینه گردد.

$$FIT(Sol_i) = \frac{U^{\alpha}}{Cost^{\beta} + sumDis^{\theta} + \frac{\sum_{J\in S_i} SERV(J) * pred(S_i)^{\gamma}}{n} + \frac{\sum_{J\in S_i}(SERV(J) - r(J))^{\delta}}{n}} \quad (۲۰)$$

$$sumDis = \sum_{i\in V} Dis(i) \quad (۲۱)$$

$$Cost = \sum_{i\in V} Dis(i) * (Fuel + Depreciation) \quad (۲۲)$$

$$U = \frac{sumDis}{\sum_{J\in S_i}(D(j))} \quad (۲۳)$$

$sumDis$، مجموع مسافت طی‌شده توسط خودروهای سرویس مدارس در راه‌حل پیشنهادی به‌عنوان مسیر حرکت وسایل نقلیه می‌باشد، n، تعداد دانش‌آموزان است، V نشانگر مجموعه خودروهای مورداستفاده به‌عنوان سرویس است، $SERV(J)$، زمان رفت‌وآمد دانش‌آموز S_i را نشان‌می‌دهد. $r(J)$، زمان رفت‌وآمد مستقیم دانش‌آموز S_i بدون انحراف و تغییر مسیر جهت سوار نمودن دانش‌آموزان دیگر است، $Dis(i)$، طول مسیر طی‌شده از طریق خودرو i می‌باشد و متغیر $pred$ میزان ازدحام پیش‌بینی‌شده برای ایستگاه سوارشدن دانش‌آموز S_i است. $Cost$، مجموع هزینه راه‌حل پیشنهادی را نشان‌می‌دهد که بر پایه مسافت طی‌شده، مصرف سوخت در هر کیلومتر $(Fuel)$ و هزینه استهلاک خودرو $(Depreciation)$ در واحد جابجایی محاسبه‌می‌شود. $D(j)$، فاصله خانه تا مدرسه دانش‌آموز S_i را نشان‌می‌دهد. توان‌های α تا θ میزان اهمیت هر کدام از پارامترها را مشخص‌می‌کند.

۴. نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با طرح پایه

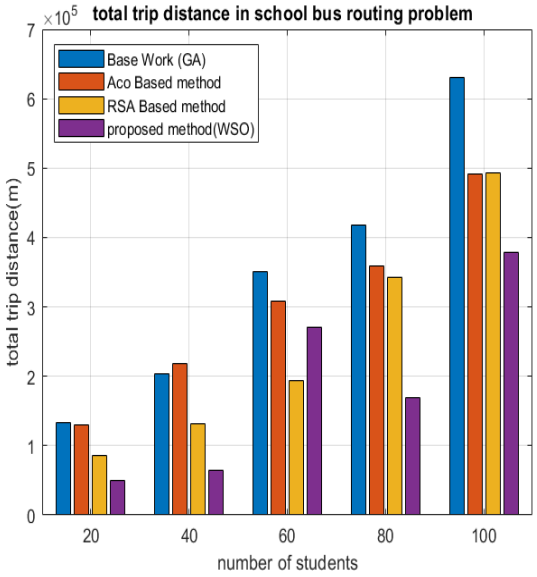
روش پیشنهادی در شبیه‌ساز متلب اجرا شده‌است. تعداد دانش‌آموز، ۱۰۰ نفر، تعداد اتوبوس ۷ دستگاه و تعداد مدرسه ۵ است. در سیستم حمل‌ونقل کنونی به‌عنوان سرویس مدارس، شاخص‌های ارزیابی عملکرد طرح شامل مجموع فواصل حرکت سرویس‌های مدارس (مجموع مسافت طی‌شده)، میانگین زمان رفت‌وآمد دانش‌آموزان (شاخص زمان سفر)، میانگین زمان انحراف دانش‌آموزان (تأخیر یا مدت‌زمان تلف‌شده به علت خروج از مسیر مستقیم)، هزینه سفر (تعداد وسایل حمل‌ونقل موردنیاز) و بهره‌وری منابع می‌باشد. بهره‌وری منابع، هزینه سفر، مجموع مسافت طی‌شده در بخش قبل بیان‌شده‌است. میانگین زمان انحراف دانش‌آموزان بر اساس طول زمان سپری‌شده در تغییر مسیرهای اتوبوس برای رساندن سایر مسافران و خروج از مسیر مستقیم محاسبه‌می‌گردد (رابطه ۲۴).. شاخص زمان سفر یا میانگین زمان رفت‌وآمد دانش‌آموزان بر اساس اختلاف مقدار پیش‌بینی‌شده برای زمان سفر هر فرد با مقدار واقعی زمان سفر وی محاسبه‌می‌گردد (رابطه ۲۵).

$$delay = \frac{\sum_{J\in S_i}(SERV(J) - r(J))}{n} \quad (۲۴)$$

$$trap\ time = \frac{\sum_{J\in S_i} SERV(J) * pred(S_i)}{n} \quad (۲۵)$$

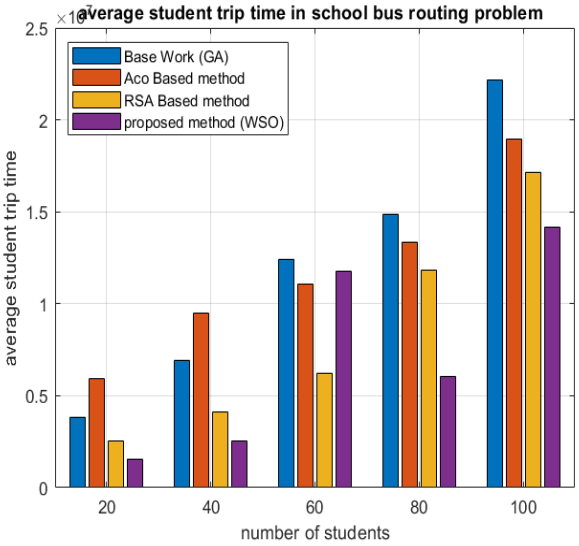
در ادامه، نتایج روش پیشنهادی با طرح پایه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک [۲۱]، روش مبتنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچگان [۲۲] و روش مبتنی بر جستجوی خزندگان مقایسه‌می‌شود. این قیاس از لحاظ چهار معیار ارزیابی مهم می‌باشد. معیارهای ارزیابی عبارتند از مجموع فواصل حرکت سرویس‌های مدارس، میانگین زمان رفت‌وآمد دانش‌آموزان، کل زمان سفر و مطلوبیت مسیریابی.

در شکل (۲)، مقایسه نتایج روش پیشنهادی از نظر مجموع فواصل حرکت سرویس مدارس مشخص‌شده‌است. نتایج روش پیشنهادی با طرح پایه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، روش مبتنی بر الگوریتم مورچگان و و روش مبتنی بر جستجوی خزندگان از لحاظ مجموع فواصل حرکت سرویس‌های مدارس مقایسه‌شده‌است. مجموع فواصل حرکت سرویس مدارس برای روش پیشنهادی برای تعداد مختلف دانش‌آموزان کمتر از روش مبتنی بر ژنتیک و روش مبتنی بر الگوریتم مورچگان بوده‌است. حتی برای تعداد دانش‌آموز بالا یعنی ۱۰۰ دانش‌آموز، نتایج روش پیشنهادی بسیار خوب بوده‌اند.



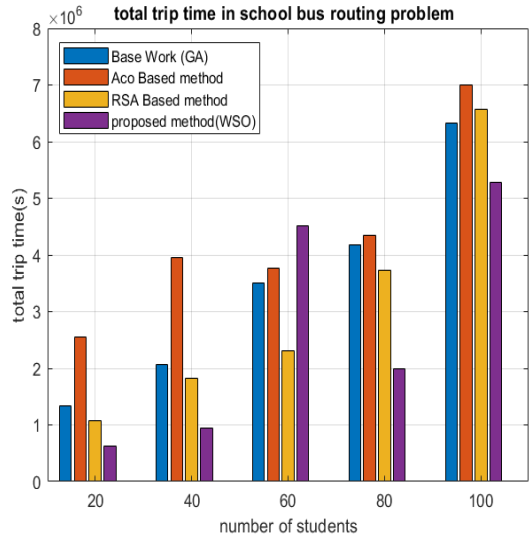
شکل ۲. مقایسه از نظر مجموع فواصل حرکت سرویس مدارس

در شکل ۳، مقایسه نتایج روش پیشنهادی از نظر میانگین زمان رفت‌وآمد دانش‌آموزان مشخص‌شده‌است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، میانگین زمان رفت‌وآمد دانش‌آموزان کمتر از طرح پایه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و روش مبتنی بر الگوریتم مورچگان بوده‌است که گواه بر عملکرد بسیار مناسب روش پیشنهادی می‌باشد.



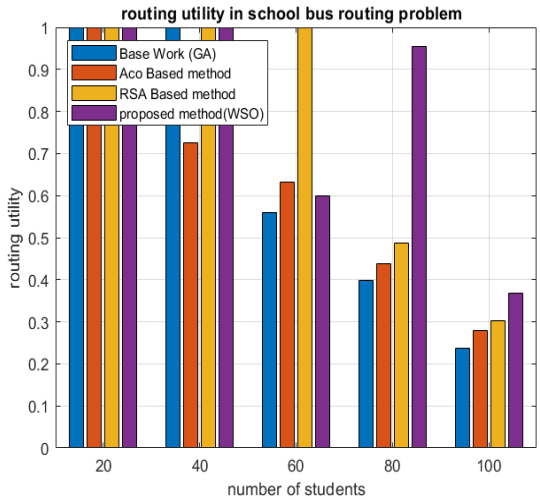
شکل ۳. مقایسه نتایج روش پیشنهادی از نظر میانگین زمان رفت‌وآمد دانش‌آموزان

در شکل۴، مقایسه نتایج روش پیشنهادی از نظر کل زمان سفر مشخص‌شده‌است. تلاش شده‌است که با لحاظ‌کردن ازدحام در مناطق پرتردد روش پیشنهادی قادر باشد در مدت‌زمان کمتر و با طی فاصله کمتری، دانش‌آموزان را با حداقل زمان، سرویس‌دهی نماید. عوامل اصلی تعیین پیچیدگی محاسباتی الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید در حل مسئله بهینه‌سازی شامل تعداد متغیرهای تصمیم مسئله (یعنی d)، هزینه تابع هدف مسئله (یعنی c)، تعداد عوامل جستجو (یعنی n) و تعداد تکرارها (یعنی K) هستند که هر به ماهیت مسئله بستگی دارند. به‌دلیل اینکه با تعداد عوامل جستجو ۵۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ به پاسخ بهینه دست‌یابد، بنابراین پیچیدگی محاسباتی الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید برای روش پیشنهادی کم است و انتخاب مناسبی بوده‌است. با توجه به پیچیدگی کمتر، پاسخ بهینه در زمان کوتاه‌تری پیدا شده‌است.



شکل ۴. مقایسه نتایج روش پیشنهادی از نظر کل زمان سفر

در شکل ۵، مقایسه نتایج روش پیشنهادی از نظر مطلوبیت مسیریابی مشخص‌شده‌است. نتایج روش پیشنهادی نسبت به طرح‌های مقایسه‌شده، بهبود داشته‌است، زیرا یک تابع بسیار جامع در روش پیشنهادی استفاده‌شده‌است که موجب یافتن جواب بهتر شده‌است. در تابع برازش، پارامترهای مجموع فواصل حرکت سرویس‌های مدارس و میانگین زمان رفت‌وآمد دانش‌آموزان، میانگین زمان انحراف دانش‌آموزان (مدت‌زمان تلف شده جهت خروج از مسیر مستقیم)، هزینه سفر و بهره‌وری منابع حمل‌ونقل لحاظ‌می‌شوند. که حل آن از طریق الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید باعث‌شده‌است که عوامل جستجوی الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید به‌طور تصادفی موقعیت خود را در ارتباط با بهترین راه‌حل‌ها به‌روز می‌کنند تا در نهایت به نتیجه مطلوب برسند و مطلوبیت مسیر یافت‌شده، بیشتر شود. بخصوص با تعداد دانش‌آموزان کمتر، مطلوبیت مسیر بسیار بالاست.



شکل ۵. مقایسه نتایج روش پیشنهادی از نظر مطلوبیت مسیریابی

۵. نتیجه‌گیری

هدف سیستم حمل‌ونقل و توزیع، تأمین کمترین هزینه و افزایش عملکرد با استفاده از روش‌های معقول و زیست‌محیطی است. برای دستیابی به این هدف، بهینه‌سازی با استفاده از سیستم‌های تکنولوژیکی ارائه‌می‌شود. با افزایش تعداد دانش‌آموزان فاصله خانه و مدرسه آن‌ها نیز افزایش-می‌یابد. در نتیجه حمل‌ونقل دانش‌آموزان به مدارس با اتوبوس‌های مدرسه به بخشی از سیستم حمل‌ونقل و توزیع تبدیل شده‌است. انتقال دانش‌آموزان به مدارس مانند سایر سیستم‌های حمل‌ونقل و توزیع با محدودیت‌ها و مسائل فرعی مواجه‌است. مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه یک گروه از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی است که به‌دلیل مسائل فرعی مانند انتقال دانش‌آموزان ناتوان یا عادی به مدارس، اتلاف وقت دانش‌آموزان در ترافیک و زمان انتظار دانش‌آموز در مدرسه، رسیدن به مدرسه به‌موقع است.

در این مقاله، رویکرد جدیدی برای مسیریابی اتوبوس مدرسه با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید ارائه‌شده‌است. تابع برازندگی مطابق با پارامترهای مجموع فواصل حرکت سرویس‌های مدارس و میانگین زمان رفت‌وآمد دانش‌آموزان، میانگین زمان انحراف دانش‌آموزان، هزینه سفر و بهره‌وری منابع حمل‌ونقل برای ارزیابی راه‌حل‌ها استفاده‌می‌شود، به موجب آن معیار تناسب در هر ارزیابی عملکرد برای تعیین محل کوسه سفید با مناسب‌ترین مقدار محاسبه-شده‌است. نشان‌می‌دهد که مناسب‌ترین راه‌حل، بهترین موقعیت برای کوسه سفیدی است که طعمه می‌یابد. استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز کوسه سفید موجب یافتن مناسب‌ترین راه‌حل‌ها شده‌است.

برای کار آینده، می توان موارد زیر را پیشنهادکرد:

- تجزیه‌وتحلیل بیشتر روش پیشنهادی بر روی مجموعه داده‌های بیشتر، نقشه‌های مختلف، برای آزمایش استحکام الگوریتم، زیرا کار ارائه‌شده فقط در نقشه مدرسه تأییدشده‌است.
- بررسی گزینه‌های مختلف برای پارامترها و اصلاح ویژگی‌های تطبیقی. این مسئله را می‌توان با درنظرگرفتن مسیریابی اتوبوس به بیش از یک مدرسه نیز تعمیم‌داد. در این مورد، مسئله به‌عنوان مسئله مسیریابی خودرو با ظرفیت زیاد مدل‌سازی‌می‌شود.
- این تحقیق بر روی یک خط اتوبوس پاسخگو به تقاضا تحت مفروضات شناخته‌شده، انجام‌شد. معمولاً سرعت حرکت وسیله نقلیه برای یک مقدار ثابت تنظیم‌می‌شود، اما در فرآیند عملیات واقعی، به‌دلیل شرایط جاده، محیط، آب و هوا و سایر عوامل، سرعت خودرو را نمی‌توان ثابت نگه‌داشت. علاوه بر این، محاسبات اطلاعات مسافران بدون پشتیبانی واقعی داده‌ها انجام‌شده‌است، زیرا نرم‌افزار به‌طور تصادفی اطلاعات تولیدمی‌کرد. در آینده، می‌توان داده‌های جریان واقعی مسافر را برای تجزیه‌وتحلیل بر اساس بررسی‌های واقعی جمع‌آوری‌کرد.
- در موارد عملی و برای اجرای الگوریتم، باید مواردی مانند انعطاف در مسیریابی درنظرگرفته‌شود. محدودیت‌ها و/یا اهدافی که امکان مسیریابی پویا را در صورت شرایط پیش‌بینی‌نشده مانند بسته‌شدن جاده‌ها، ترافیک یا شرایط اضطراری فراهم‌می‌سازد، ممکن است اصلاح‌شوند. برای تخمین دقیق‌تر زمان سفر و جلوگیری از ازدحام ترافیک باید داده‌های ترافیکی بی‌درنگ یا تاریخی گنجانده‌شود. به‌منظور اطمینان از کیفیت خدمات، اهداف مربوط به کیفیت خدمات، مانند به حداقل رساندن تعداد توقف‌هایی که هر دانش‌آموز باید تحمل‌کند یا اطمینان از اینکه هیچ دانش‌آموزی برای مدت بیش‌ازحد طولانی در اتوبوس نیست، می‌تواند گنجانده-شود. در نهایت، ملاحظات برابری مانند اطمینان از اینکه الگوریتم مسیریابی خدمات عادلانه‌ای را در محله‌های مختلف ارائه‌می‌دهد و اجتناب از سوگیری نسبت به مناطق خاص بسیار مهم است.

منابع

[1] Hariri, Mehdi, (1402), face recognition in the image using the Viola-Jones method and image texture analysis, intelligent multimedia processing and communication systems.. 1-10. [Persian]

[2] Mousavi, Zeinab, Kerami, Elaha, Gholami, Kobra, (1402), Using discrete-time Zhang neural networks for time-varying nonlinear optimization, intelligent multimedia processing and communication systems. 31-42. [Persian]

[3] Nazarpour, Mohammad, Nazafti, Naveed, Shakuhyar, Sajjad, (1402), using the modified colonial competition algorithm to increase the speed and accuracy of intelligent intrusion detection system, intelligent multimedia processing and communication systems. [Persian]

[4] Bakeshlu, Maryam, Tahghighi Sharbyan, Mohammad, (1401), presenting a new approach based on deep learning technique to investigate the factors affecting the use of social networks and students' academic performance, intelligent multimedia processing and communication systems. 29-41 [Persian]

[5] Bala Kodehi, Javad, Research Sharbian, Mohammad, (1401), presenting a method to identify and detect fraud in credit cards using the hybrid algorithm of neural network and colonial competition, intelligent multimedia processing and communication systems 62-51. [Persian]

[6] Xue, Z., Deng, X., Chen, B., & Khamis, A. (2023, March). School bus routing using metaheuristics algorithms. In *2023 IEEE International Conference on Smart Mobility (SM)* (pp. 33-38). IEEE.

[7] Feng, R., Zhang, J., Wu, Y., Wu, R., & Yao, B. (2023). School accessibility evaluation under mixed-load school bus routing problem strategies. *Transport policy*, *131*, 75-86.

[8] Calvete, H. I., Galé, C., Iranzo, J. A., & Toth, P. (2023). The school bus routing problem with student choice: a bilevel approach and a simple and effective metaheuristic. *International Transactions in Operational Research*, *30*(2), 1092-1119.

[9] Qian, L. (2023). *A Neural Combinatorial Approach for School Bus Routing System Optimization* (Doctoral dissertation, Northeastern University).

[10] Braik, M., Hammouri, A., Atwan, J., Al-Betar, M. A., & Awadallah, M. A. (2022). White Shark Optimizer: A novel bio-inspired meta-heuristic algorithm for global optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, *243*, 108457.

[11] Konstantinos, G., & Dimitra, A. (2023, July). School Bus Routing Problem-Algorithm Optimization Using Graph Theory. In *Science and Information Conference* (pp. 185-218). Cham: Springer Nature Switzerland.
[12] Ellegood, W. A., Riley, J. M., & Berg, M. D. (2024). The many costs of operating school buses in America. *Research in Transportation Economics*, *103*, 101401.
[13] Effendy, S., & Yap, R. H. (2023). Real-time passenger bus routing problems with preferences and tradeoffs. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, *91*(2), 287-307.
[14] Kumar, Y., & Jain, S. (2015, September). School bus routing based on branch and bound approach. In *2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4)* (pp. 1-4). IEEE.
[15] Wang, J. Y., Wu, Z., Kang, Y., Brown, E., Wen, M., Rushton, C., & Ehrgott, M. (2023). Walking school bus line routing for efficiency, health and walkability: A multi-objective optimisation approach. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, *30*(3-4), 109-131.
[16] Calvete, H. I., Galé, C., & Iranzo, J. A. (2022). Approaching the Pareto front in a biobjective bus route design problem dealing with routing cost and individuals' walking distance by using a novel evolutionary algorithm. *Mathematics*, *10*(9), 1390.
[17] Caldas, L., Martinelli, R., & Rosa, B. (2022, September). Solving a School Bus Routing Problem in Rural Areas: An Application in Brazil. In *International Conference on Computational Logistics* (pp. 162-176). Cham: Springer International Publishing.
[18] Sciortino, M., Lewis, R., & Thompson, J. (2022). A school bus routing heuristic algorithm allowing heterogeneous fleets and bus stop selection. *SN Computer Science*, *4*(1), 74.
[19] Liu, Z., Gang, L., Yu, B., & Zhang, H. (2022). The routing problem for school buses considering accessibility and equity. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *107*, 103299.
[20] Botian, L., Xinglu, L., & Kin, C. W. (2022, August). Multi School Bus Routing Problem with Road Safety Factor via A Heuristic Algorithm. In *2022 34th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)* (pp. 5013-5018). IEEE.
[21] Rashidi Komijan, A., Ghasemi, P., Khalili-Damghani, K., & HashemiYazdi, F. (2021). A new school bus routing problem considering gender separation, special students and mix loading: a genetic algorithm approach. *Journal of optimization in industrial engineering*, *14*(2), 23-39.
[22] Babaei, M., & Rajabi-Bahaabadi, M. (2019). School bus routing and scheduling with stochastic time-dependent travel times considering on-time arrival reliability. *Computers & Industrial Engineering*, *138*, 106125.
[23] Ümit, Ü. G., & Kılıç, F. (2019, October). A school bus routing problem using genetic algorithm by reducing the number of buses. In *2019 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)* (pp. 1-6). IEEE.
[24] Hashi, E. K., Hasan, M. R., & Zaman, M. S. U. (2016, December). GIS based heuristic solution of the vehicle routing problem to optimize the school bus routing and scheduling. In *2016 19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)* (pp. 56-60). IEEE.
[25] Huo, L., Yan, G., Fan, B., Wang, H., & Gao, W. (2014, August). School bus routing problem based on ant colony optimization algorithm. In *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)* (pp. 1-5). IEEE.
[26] Han, X., & Zhang, X. (2019, April). School Bus Route Optimization Based on Improved Ant Colony Algorithm. In *2019 4th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT)* (pp. 312-316). IEEE.
[27] Wang, J., & Huang, X. (2017, August). Routing school bus for better student learning. In *2017 25th International Conference on Geoinformatics* (pp. 1-7). IEEE.
[28] Sarubbi, J. F., Mesquita, C. M., Wanner, E. F., Santos, V. F., & Silva, C. M. (2016, April). A strategy for clustering students minimizing the number of bus stops for solving the school bus routing problem. In *NOMS 2016-2016 IEEE/IFIP network operations and management symposium* (pp. 1175-1180). IEEE.
[29] Guo, X., Liu, Y., & Samaranayake, S. (2018, November). Solving the school bus routing problem at scale via a compressed shareability network. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 1900-1907). IEEE.
[30] Silva, C. M., Sarubbi, J. F., Silva, D. F., Porto, M. F., & Nunes, N. T. (2015, September). A mixed load solution for the rural school bus routing problem. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 1940-1945). IEEE.
[31] Hou, Y. E., Dang, L., Dong, W., & Kong, Y. (2020). A metaheuristic algorithm for routing school buses with mixed load. *IEEE Access*, *8*, 158293-158305.
[32] Ra'ed, M., & Nahar, K. M. (2017, December). SRT-GA: smart real-time system using a powerful genetic algorithm for school bus routing problem. In *2017 2nd International Conference on the Applications of Information Technology in Developing Renewable Energy Processes & Systems (IT-DREPS)* (pp. 1-8). IEEE.
[33] Ozmen, M., & Sahin, H. (2021, January). Real-time optimization of school bus routing problem in smart cities using genetic algorithm. In *2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)* (pp. 1152-1158). IEEE.

پی‌نوشت

[1] School Bus Routing Problem
[2] Mixed Integer Linear Programming (Milp)
[3] Walking School Bus (Wsb)
[4] Uniform Random Initialization