Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers
Vol. 23 No. 2, 2026
DOI: 10.66224/jiaeee.23.2.76

Rapid Intelligent Routing for Heterogeneous Drones in Irregular Paths Using an Advanced Adaptive Algorithm

Hamid Sayyadi[1], Mahmood Mohassel Feghhi[2]*,Javad Sayyadi[3]

[1] Ph.D. Student, Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
h.sayyadi1400@ms.tabrizu.ac.ir
[2] Associate Professor, Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
mohasselfeghhi@tabrizu.ac.ir
[3] Ph.D. Student, Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
j.sayyadi1400@ms.tabrizu.ac.ir

Abstract :

In this paper, a rapid intelligent routing method for heterogeneous drones in irregular paths is presented. This method, utilizing an advanced adaptive algorithm, enables drones to intelligently determine their path in uneven environments and execute various missions. By adapting clustering to environmental features, drones can respond accurately and swiftly to environmental changes, benefiting from optimal routing to achieve their mission objectives. Simulation results indicate that using this routing method enhances the performance and efficiency of drones in urban missions and, more importantly, reduces the execution time of routing compared to other common methods, effectively completing tasks with high accuracy in the shortest possible time. This paper aims to provide a significant advancement in drone routing in irregular environments such as urban areas, with wide-ranging applications in security, surveillance, and communications.

Keywords: **Intelligent Routing, Heterogeneous Drones, Advanced Adaptive Algorithm, Reduced Execution Time**

Article Type: Research

Received: 11. 06. 2024

Revised: 25. 12. 2025

Accepted: 18. 05. 2026

Corresponding author: M. Mohassel Feghhi

Corresponding author's address: Faculty of Elec. & Comp. Eng., U. of Tabriz, 29 Bahman Blvd., Tabriz, Iran

Copyright © 2026 The Authors. Published by Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. Motivation of the work

The rapid proliferation of urban drone applications—including surveillance, emergency response, and delivery services—has created an urgent need for routing strategies that are not only accurate but also extremely fast. Heterogeneous drone fleets operating in irregular, non-uniform environments face dynamic obstacles, variable traffic patterns, and stringent physical constraints such as limited battery life, speed, and payload capacity. Traditional routing algorithms, while reliable in static or ideal settings, often suffer from high computational complexity and prolonged execution times, making them unsuitable for real-time urban missions.

A detailed review of existing methods, including STCA_NA, STCA_NA_GA, PSO, and ACO, reveals that their execution time grows significantly as the number of network nodes increases, directly compromising mission responsiveness. This observation motivated the present research: to design a routing method that drastically reduces execution time while maintaining high accuracy and adaptability. The advanced adaptive algorithm proposed here is specifically chosen because it leverages adaptive clustering based on environmental features, enabling drones to make local, low-complexity decisions rather than relying on expensive global re-optimization. As shown in the simulation results, this model achieves an execution time of only 85 ms for 200 nodes, substantially outperforming existing algorithms. The main impact of this research is therefore enabling real-time, energy-efficient, and scalable drone routing in complex urban landscapes, with direct benefits for security, surveillance, and communication missions.

2. Contributions

This work introduces four principal contributions to the field of heterogeneous drone routing in irregular urban environments.

First, a novel advanced adaptive clustering algorithm is proposed that fundamentally reduces routing execution time. Unlike existing methods such as STCA_NA, STCA_NA_GA, PSO, and ACO, which suffer from rapidly increasing computational loads as network nodes grow, the proposed algorithm maintains near-linear complexity. Simulation results demonstrate that at 200 nodes, the proposed method achieves only 85 ms execution time, compared to 280 ms (STCA_NA), 180 ms (STCA_NA_GA), 480 ms (PSO), and 310 ms (ACO). This represents a minimum 53% improvement over the next best algorithm.

Second, the algorithm incorporates dynamic cluster redistribution based on a minimum sample threshold (minSamples = 5) and convergence criterion (epsilon = 0.001), ensuring robust performance even when environmental conditions change unexpectedly.

Third, the method integrates real physical constraints of heterogeneous drones—including weight, range, mission time window, sensors, and dynamic motion limits as specified in Table 1—directly into the clustering and routing process, bridging the gap between theoretical optimization and practical deployability.

Fourth, by enabling local, adaptive decision-making with low computational overhead, the proposed approach is inherently suitable for real-time onboard implementation on resource-constrained drone hardware, a critical requirement often overlooked in prior research.

These contributions collectively establish a scalable, fast, and physically aware routing framework for urban drone operations.

3. Procedures

This study involves computational simulation procedures to evaluate the performance of the proposed advanced adaptive routing algorithm for heterogeneous drones in irregular urban environments. No human or animal subjects were involved; instead, the "subjects" are ten heterogeneous drones (N = 10) with distinct physical specifications as defined in Table 1. These drones include quadcopter, hexacopter, tricopter, and octocopter types, each characterized by weight (1.2–4.0 kg), range (5–15 km), mission time window (25–50 minutes), onboard sensors (HD camera, thermal camera, LIDAR), and dynamic speed limits (30–45 km/h).

The experiment required each drone to perform routing tasks under irregular, non-uniform urban environmental conditions. An urban environment matrix was first constructed in MATLAB (Figure 2), incorporating city structure, obstacle positions, traffic points, and possible routes. The advanced adaptive clustering algorithm was then applied to partition drones into clusters (Y = 5 clusters) based on four-dimensional feature similarity using Euclidean distance (Equation 1). Cluster centers were iteratively updated, and convergence was checked against epsilon = 0.001 with a maximum of 100 iterations. A redistribution mechanism (minSamples = 5) ensured that no cluster fell below the minimum sample size.

The primary measurement was **execution time (milliseconds)** for routing as a function of network node count (from 10 to 200 nodes). This was compared across five algorithms: the proposed method, STCA_NA, STCA_NA_GA, PSO, and ACO. All simulations were conducted in the MATLAB environment under identical conditions to ensure fair comparison.

4. Findings

The simulation results reveal four major findings that demonstrate the superiority of the proposed advanced adaptive routing algorithm for heterogeneous drones in irregular urban environments.

First, the proposed algorithm significantly reduces routing execution time compared to all reference methods. At 200 network nodes, execution times were: proposed method = 85 ms, STCA_NA = 280 ms, STCA_NA_GA = 180 ms, PSO = 480 ms, and ACO = 310 ms. This represents a 53% improvement over the next best algorithm (STCA_NA_GA) and an 82%

improvement over the worst performer (PSO). Even at 10 nodes, the proposed method achieved 5 ms compared to 15 ms (STCA_NA), 10 ms (STCA_NA_GA), 25 ms (PSO), and 12 ms (ACO).

Second, the proposed algorithm exhibits superior scalability. As node count increases from 10 to 200, execution time increases only gradually (from 5 to 85 ms), whereas PSO jumps from 25 to 480 ms and STCA_NA from 15 to 280 ms. This near-linear complexity makes the proposed method highly suitable for large-scale urban deployments.

Third, the adaptive clustering mechanism with dynamic redistribution (minSamples = 5) successfully maintains stable cluster formation even under varying environmental conditions, as visualized in Figures 3 and 4. The four-dimensional clustering incorporating drone physical constraints (Table 1) ensures that generated paths are not only computationally efficient but also physically feasible.

Fourth, the low computational overhead supports real-time onboard implementation on resource-constrained drone hardware, a critical advantage for practical urban missions requiring split-second decision-making.

These findings are highly significant: they enable faster, scalable, and physically aware drone routing, directly enhancing operational efficiency in security, surveillance, and communication missions.

5. Conclusion

The major outcome of this study is the successful development and validation of an advanced adaptive routing algorithm that substantially reduces execution time for heterogeneous drone routing in irregular urban environments. The proposed method, leveraging adaptive clustering based on environmental features, achieved execution times of only 5 ms at 10 nodes and 85 ms at 200 nodes, outperforming STCA_NA (280 ms), STCA_NA_GA (180 ms), PSO (480 ms), and ACO (310 ms) at the largest network size, representing a minimum 53% improvement over the next best algorithm.

Beyond raw speed, the algorithm demonstrated excellent scalability, maintaining near-linear complexity as node count increased twentyfold. By incorporating real physical constraints of heterogeneous drones—weight, range, mission time windows, sensors, and speed limits as specified in Table 1—the method ensures that generated paths are not only computationally efficient but also practically deployable. The dynamic cluster redistribution mechanism (minSamples = 5) and convergence criterion (epsilon = 0.001) provide robustness against unexpected environmental changes.

This outcome is significant because it enables real-time, onboard routing for resource-constrained drones in time-sensitive urban missions. The proposed framework directly supports applications in security surveillance, emergency response, and delivery services, offering a scalable and physically aware solution for next-generation drone operations.

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال بیست و سوم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۵، صفحات ۷۶-۸۴

DOI: 10.66224/jiaeee.23.2.76

مسیریابی هوشمند سریع برای پهپادهای ناهمگن در مسیرهای غیریکنواخت با استفاده از الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته

حمید صیادی [۱]، محمود محصل فقهی [۲*]، جواد صیادی [۳]

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران

j.sayyadi1400@ms.tabrizu.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران

mohasselfeghhi @tabrizu.ac.ir

۳-دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران

h.sayyadi1400@ms.tabrizu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک روش مسیریابی هوشمند سریع برای پهپادهای ناهمگن در مسیرهای غیریکنواخت ارائه می‌شود. این روش، با استفاده از الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته، به پهپادها امکان می‌دهد تا به طور هوشمندانه مسیر خود را در محیط‌های غیریکنواخت تعیین کرده و مأموریت‌های مختلف را اجرا کنند که از طریق تطبیق خوشه‌بندی با ویژگی‌های محیطی، پهپادها قادر خواهند بود تا به‌صورت دقیق و سریع به تغییرات محیط پاسخ دهند و از مسیریابی بهینه برای دستیابی به اهداف مأموریتی خود بهره‌مند شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از این روش مسیریابی، باعث بهبود عملکرد و کارایی پهپادها در مأموریت‌های شهری و از آن مهم‌تر، باعث کاهش زمان اجرای مسیریابی در مقایسه با سایر روش‌های رایج می‌گردد و به عبارتی انجام وظایف بادقت بالا در کمترین زمان انجام می‌شود. این مقاله تلاش می‌کند تا یک ارتقاء قابل توجه در حوزه مسیریابی پهپادها در محیط‌های غیریکنواخت مانند محیط‌های شهری ارائه دهد و کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های امنیتی، نظارتی و ارتباطات را به دنبال داشته باشد.

کلمات کلیدی: مسیریابی هوشمند، پهپادهای ناهمگن، الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته، کاهش زمان اجرا

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمود محصل فقهی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تبریز – بلوار ۲۹ بهمن– دانشگاه تبریز – دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر – گروه مهندسی مخابرات

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۵ ©. ناشر این مقاله، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، با پیشرفت روزافزون تکنولوژی پهپادها و اهمیت بیشتری که در مأموریت‌های مختلف ایفا می‌کنند، نیاز به روش‌های هوشمند و بهینه‌سازی مسیریابی برای پهپادها در محیط‌های غیریکنواخت افزایش‌یافته است[۱]. با توجه به تنوع بالای مأموریت‌ها و ویژگی‌های مختلف پهپادها، انجام مسیریابی هوشمند و مؤثر برای آن‌ها چالش‌هایی از جمله هماهنگی، انعطاف‌پذیری و بهره‌وری را ایجاب می‌کند. در این راستا، مسیریابی هوشمند برای پهپادهای ناهمگن در مأموریت‌های شهری با استفاده از الگوریتم مبتنی بر خوشه‌بندی تطبیقی به‌عنوان یک رویکرد نوآورانه مورد توجه قرار گرفته است[۲].

یکی از مواردی که این مقاله به آن پرداخته است، استفاده از الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته برای مسیریابی پهپادها در محیط‌های غیریکنواخت است[۳]. این الگوریتم‌ها با توجه به ویژگی‌های محیطی و شرایط موجود، پهپادها را به گروه‌های کوچک‌تر یا "خوشه‌ها" تقسیم می‌کنند و سپس مسیرهای بهینه را برای هر خوشه تعیین می‌کنند[۴]. این روش‌ها از انعطاف و تطبیق بالایی برخوردار هستند و به پهپادها اجازه می‌دهند تا با شرایط محیطی متغیر مواجه شوند و به‌صورت هماهنگ و هم‌زمان اقدامات خود را انجام دهند[۵].

در حوزه مسیریابی هوشمند، این الگوریتم‌ها از توانایی مدیریت زمان، مکان، سرعت و ویژگی‌های شرایط محیطی استفاده می‌کنند تا مسیرهایی را برای پهپادها تعیین کنند که باعث بهبود کارایی و دقت در انجام مأموریت‌های شهری می‌شود[۶]. به‌علاوه، با توجه به نوآوری و پیشرفت‌های اخیر در این حوزه، امکانات و قابلیت‌های جدیدی به الگوریتم‌های مسیریابی چهاربعدی اضافه شده است که باعث بهبود عملکرد و انعطاف‌پذیری آن‌ها شده است[۷].

در این مقاله، به بررسی و مقایسه روش‌های مختلف مسیریابی هوشمند برای پهپادهای ناهمگن در مأموریت‌های شهری پرداخته شده است. با معرفی و توضیح این روش‌ها، مزایا و معایب هر یک بررسی شده و نقاط قوت و ضعف آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است[۸]. این مقاله نه‌تنها به ارتقا دانش در حوزه مسیریابی پهپادها کمک می‌کند، بلکه امکانات جدیدی را برای استفاده در مأموریت‌های شهری فراهم می‌کند و به توسعه فناوری پهپادها در این حوزه کمک می‌کند.

یافته‌های کلیدی این مقاله به شرح زیر است:

تحولی در کاهش زمان اجرا مسیریابی: این پژوهش مسیریابی هوشمند برای پهپادهای ناهمگن در مأموریت‌های شهری را به عنوان یک محیط غیریکنواخت آغاز می‌کند. با بهره‌گیری از یک الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته نوآورانه، یک رویکرد پیشرو برای هدایت پهپادها و کاهش زمان مسیریابی در مناظر شهری پیچیده به شکل کارآمد و مؤثر، معرفی می‌کند.

معرفی الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته: یک الگوریتم برشکستگی مبتنی بر اصول خوشه‌بندی تطبیقی معرفی می‌شود تا چالش‌های منحصربه‌فرد مسیریابی در محیط‌های شهری را مدیریت کند. این الگوریتم به‌صورت پویا به تغییرات محیط پاسخ می‌دهد، این امکان را به پهپادها می‌دهد که مسیرهای بهینه را با درنظرگرفتن عوامل مختلفی مانند الگوهای ترافیک، موانع و شرایط محیطی انتخاب کنند.

بهینه‌سازی کارایی و چندکاربری: الگوریتم توسعه‌یافته به‌صورت هم‌زمان به بهره‌مندی از کارایی و انطباق‌پذیری اولویت می‌دهد، این امر به پهپادها این امکان را می‌دهد که به طور بی‌وقفه در مناظر شهری متنوع حرکت کنند. با دربرگیری داده‌ها و بازخوردهای بی‌درنگ، انتخاب مسیر بهینه برای کاهش زمان سفر و بالابردن نرخ موفقیت مأموریت را حتی در مواجهه با موانع غیرمنتظره یا تغییرات در محیط بهبود می‌بخشد[۹].

کاربردهای عملی در مأموریت‌های شهری: رویکرد پیشنهادی تأثیرات قابل‌توجهی در مأموریت‌های شهری از جمله نظارت، واکنش‌های اضطراری و خدمات تحویل دارد. با اینکه پهپادها را قادر می‌سازد که به طور هوشمندانه در محیط‌های شهری مأموریت‌ها را برنامه‌ریزی و اجرا کنند، کارآمدی عملیاتی را افزایش می‌دهد، هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و نتایج کلی مأموریت را بهبود می‌بخشد.

۲- پیشینه پژوهش

روش مبتنی بر خوشه‌بندی فضایی - زمانی با استراتژی نزدیک‌ترین به همه (STCA_NA) یک رویکرد نوآورانه است که برای حل چالش‌های برنامه‌ریزی مسیر، به‌ویژه در محیط‌های شهری طراحی شده است[۱۰]. این الگوریتم اصول خوشه‌بندی فضایی و زمانی را با استراتژی نزدیک‌ترین به همه ترکیب می‌کند تا بتواند پهپادهای بدون سرنشین را به طور کارآمد از طریق مناطق شهری هدایت کند.

در سال‌های اخیر، علاقه به توسعه الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر که قادر به مدیریت پیچیدگی‌های محیط‌های واقعی مانند مناطق شهری با موانع پویا و شرایط تغییرپذیر هستند، روبه‌افزایش است. الگوریتم STCA_NA به‌عنوان یک راه‌حل قابل‌اعتماد به دلیل توانایی ایجاد مسیرهای بهینه برای پهپادها از طریق تکنیک‌های خوشه‌بندی فضایی و زمانی شناخته شده است.

هدف اصلی از الگوریتمSTCA_NA، تولید مسیرهای بهینه برای پهپادها با استفاده از تکنیک‌های خوشه‌بندی فضایی و زمانی است. با خوشه‌بندی نقاط داده‌ای بر اساس نزدیکی و خصوصیات زمانی آن‌ها، این الگوریتم قادر است مناطقی از علاقه و موانع محتمل در مسیر پرواز پهپاد را شناسایی کند. این خوشه‌بندی فضایی - زمانی این الگوریتم به آن امکان می‌دهد که شرایط پویای محیط را در نظر بگیرد و فرایند برنامه‌ریزی مسیر را به طور متناسب تغییر دهد[۱۱].

یکی از ویژگی‌های کلیدی الگوریتم STCA_NA قدرت استفاده از استراتژی نزدیک‌ترین به همه است که کارآمدی و انعطاف‌پذیری برنامه‌ریزی مسیر را افزایش می‌دهد. این استراتژی، به‌جای وابستگی کامل به همسایه نزدیک‌ترین برای انتخاب مسیر، چندین نقطه داده‌ای مجاور را برای شناسایی مسیر مناسب‌تر پهپاد در نظر می‌گیرد. با

ارزیابی گسترده‌ترین گزینه‌ها، الگوریتم می‌تواند مسیرهای بهینه را کـه زمان سفر را کمتر کنـد و از موانـع محتمـل بهتـری جلـوگیری کنـد، شناسایی کند.

برخی ایرادات الگوریتم STCA_NA شامل موارد زیر است:

حساسیت به تنظیمـات پـارامتری: الگـوریتم STCA_NA بـرای عملکرد بهینه نیازمند تنظیمات دقیق پارامترهـا اسـت. ایـن پارامترهـا شامل نرخ بخارش، اطلاعات هیوریستیک و سایر پارامترهای مرتبط بـا فرایند خوشه‌بندی و استراتژی نزدیک‌ترین به همه هستند. تنظیم ایـن پارامترها به طور دقیق نیازمند آزمایش‌های گسترده و زمـان‌بر اسـت و ممکن است در برخی حالات به‌دشواری انجام پذیرد[۱۲].

وابستگی به مشکلات خوشه‌بندی: عملکرد الگوریتم STCA_NA بسیار وابسته به کیفیت خوشـه‌بندی اسـت. درصـورتی‌که خوشـه‌بندی نامناسبی انجام شود یا خوشه‌ها به طور دقیق مشخص نشوند، عملکـرد الگوریتم قابلیت کاهش می‌یابد و مسیرهای غیربهینه تولید می‌شوند.

احتمال بروز شـرایط غیرقابـل پیش‌بینـی: در محیط‌هـای پویـا و پیچیده، ممکن است شرایط ناپیش‌بینی مانند ظهـور موانـع جدیـد یـا تغییرات ناگهانی در محیط رخ دهند. ایـن شـرایط می‌تواننـد عملکـرد الگوریتم را تحت تأثیر قرار داده و مسیرهای زمـانی غیرقابـل اسـتفاده تولید کنند[۱۳].

الگـوریتم اصـلاح شـده STCA_NA بـا اسـتراتژی بهینه‌سـازی سفارش مبتنی بر GA (STCA_NA_GA) یک روش پیشرفته است که به حل مسائل برنامـه‌ریزی مسـیر در محیط‌هـای پیچیـده و پویـا، به‌ویژه در محیط‌های شـهری می‌پـردازد. ایـن الگـوریتم بـر روی روش مبتنی بر خوشه‌بندی مکانی - زمانی با استراتژی نزدیک‌ترین به همـه (STCA_NA) ساخته شده و با ادغام یک الگـوریتم ژنتیـک (GA) برای بهینه‌سـازی ترتیـب، کـارایی و انعطاف‌پـذیری را در راه‌حل‌هـای برنامه‌ریزی مسیر ارتقا می‌دهد.

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌هـای برنامـه‌ریزی مسـیر بـه اهمیـت بسزایی در زمینه‌های مختلف از جمله رباتیک، حمل‌ونقل و لجسـتیک رسیده‌اند، جایی که ناوبری کارآمد در محیط‌های پیچیده اساسی است. الگوریتم STCA_NA_GA راه‌حلی نوآورانـه بـرای ایـن چالش‌هـا بـا ترکیـب قـدرت‌های خوشـه‌بندی مکـانی - زمـانی بـا تکنیک‌هـای بهینه‌سازی ژنتیک ارائه می‌دهد[۱۴].

ویژگـی اصـلی الگـوریتم STCA_NA_GA در توانـایی تولیـد ترتیب‌های بهینه برای عبور بهینه از محیط‌های پیچیده است. برخلاف الگوریتم‌های سـنتی برنامـه‌ریزی مسـیر کـه تنهـا بـر روی روش‌هـای هیوریسـتیک یـا خوشـه‌بندی تکیـه می‌کننـد، الگـوریتم STCA_NA_GA از بهینه‌سازی ژنتیک برای بهبود ترتیب بخش‌های مسیر استفاده می‌کند. با تکامل تکاملی راه‌حل‌های جایگزین، بر اساس اصول ژنتیکی مانند تراز، مبادله و جهش، الگوریتم مسیرهای بهینـه را شناسـایی می‌کنـد کـه زمـان عبـور را کمینـه و کـارایی را بیشـینه می‌کند[۱۵].

روش STCA_NA با استفاده از استراتژی بهینه‌سـازی سـفارش مبتنی برGA ، به‌طورکلی بهبـود و اصـلاح‌های مهمـی را در الگـوریتم اصلی STCA_NA ارائه می‌دهد. اما همچنان ممکن است با چالش‌هـا و ایراداتی روبه‌رو شود که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره خواهیم کرد:

پارامترهای الگوریتم: تنظیم و بهینه‌سازی پارامترهـای الگـوریتم GA ممکن اسـت یـک وظیفـه زمـان‌بر و غیـرمطمئن باشـد. انتخـاب نادرست پارامترها ممکن است به نتایج غیربهینه یا حتـی بـه شکسـت الگوریتم منجر شود.

حساسیت به انتخاب‌های اولیه: عملکرد الگوریتم GA ممکن است به طور قابل‌توجهی به انتخاب اولیه جمعیت و پارامترهای دیگر وابسته باشد. انتخاب نادرست این پارامترها ممکن است باعث بهبـود ناپـذیری الگوریتم شود.

عدم قطعیت در عملکرد: استفاده از روش‌های تصادفی مانند GA ممکن است باعث شود که الگوریتم به نتایج متفاوت در هر اجرا برسـد. این عدم قطعیت می‌تواند تصمیم‌گیری در مورد بهینه‌سـازی و ارزیـابی عملکرد الگوریتم را دچار ابهام کند[۱۶].

کاهش تنوع: در برخی موارد، عملکرد الگوریتم GA ممکن اسـت باعث کاهش تنوع در جمعیت شود که این موضوع می‌توانـد منجـر بـه اسیر شدن در شوک‌های محلی و عدم بهبود راه‌حل‌ها شود.

انتقال پارامترها: انتقال پارامترها و نتایج بین الگوریتم‌های مختلف در یک فرایند بهینه‌سازی ممکن است مشکلاتی ایجاد کند که نیازمند مکانیزم‌های مناسب برای هماهنگی و تطبیق آن‌ها است[۱۷].

۳- روش پیشنهادی

هدف ما در این مقاله کاهش‌دادن زمان اجرا در مسیریابی پهپـاد-هـای نـاهمگن در محـیط‌هـای غیریکنواخـت در مقایسـه بـا سـایر الگوریتم‌های مهم موجـود، اعـم از الگـوریتم STCA_NA، الگـوریتم STCA_NA_GA، الگـوریتم کلنـی مورچگـان اسـت و در ادامـه الگوریتمی را ارائه می‌نماییم که این نوآوری را ایجاد مـی‌کنـد و سـبب کاهش زمان اجرا در مسیریابی پهپـادهـای نـاهمگن در مأموریت‌هـای شهری نسبت به سایر الگوریتم‌ها می‌گردد. محاسبه معیارهای شـباهت یا فاصله بین داده‌ها بستگی به نوع داده‌ها و ویژگی‌های مـورد بررسـی مطابق شکل ۱ دارد.



شکل (۱): فرایند مسیریابی هوشمند مبتنی‌بر الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته

الگوریتم مسیریابی هوشمند برای پهپادهای ناهمگن در محیط‌های غیریکنواخت با استفاده از الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته

۱ برای هر نمونه انجام بده
۲ خوشه‌ای را انتخاب کن که فاصله آن کمترین است.
۳ نمونه‌ها را به خوشه‌های متناظر اختصاص بده.
۴ محاسبه مراکز جدید خوشه‌ها
۵ تعریف یک ماتریس جدید به اندازه (y × m) برای ذخیره مراکز جدید
۶ برای هر خوشه انجام بده:
۷ محاسبه میانگین ویژگی‌های نمونه‌های متعلق به خوشه.
۸ تعیین مرکز جدید خوشه با توجه به میانگین محاسبه شده
۹ به‌روزرسانی مراکز خوشه‌ها:
۱۰ محاسبه فاصله بین مراکز جدید و مراکز قبلی.
۱۱ محاسبه فاصله اقلیدسی بین دو ماتریس با رابطه (۱)
۱۲ به‌روزرسانی مراکز با استفاده از مراکز جدید.
۱۳ پایان
۱۴ پایان
۱۵ بررسی شرط همگرایی:
۱۶ اگر
۱۷ فاصله بین مراکز جدید و قبلی کمتر از epsilon باشد، الگوریتم را متوقف کن.
۱۸ پایان
۱۹ توزیع مجدد نمونه‌ها اگر لازم باشد:
۲۰ بررسی برای هر خوشه:
۲۱ اگر
۲۲ تعداد نمونه‌های متعلق به خوشه کمتر از minSamples باشد،
۲۳ محاسبه بیشینه فاصله بین نمونه‌ها و مرکز خوشه.
۲۴ انتخاب یک نمونه با بیشینه فاصله و اختصاص دادن آن به خوشه.
۲۵ به‌روزرسانی مراکز خوشه‌ها پس از توزیع مجدد:
۲۶ محاسبه فاصله بین مراکز جدید و مراکز قبلی.
۲۷ محاسبه فاصله اقلیدسی بین دو ماتریس مطابق رابطه (۱)
۲۸ به‌روزرسانی مراکز با استفاده از مراکز جدید.
۲۹ بررسی شرط همگرایی پس از توزیع مجدد:
۳۰ اگر
۳۱ فاصله بین مراکز جدید و قبلی کمتر از epsilon باشد، الگوریتم را متوقف کن
۳۲ پایان

در ادامه تعدادی از معیارهای معمول برای محاسبه شباهت و فاصله در الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته را بررسی می‌کنیم:

فاصله اقلیدسی: این معیار بر اساس فاصله جغرافیایی بین دو نقطه در فضای چندبعدی عمل می‌کند. برای دو نقطه با ویژگی‌های $(x_1, y_1, z_1, \ldots)$ و $(x_2, y_2, z_2, \ldots)$ فاصله اقلیدسی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_{ex} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 + \ldots} \quad (۱)$$

فاصله منهتنی: در این معیار، فاصله بین دونقطه برابر با مجموع قدرمطلق تفاضل مقادیر ویژگی‌هایشان است. برای دونقطه با ویژگی‌های $(x_1, y_1, z_1, \ldots)$ و $(x_2, y_2, z_2, \ldots)$ فاصله منهتنی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_{man} = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| + |z_1 - z_2| + \ldots \quad (۲)$$

فاصله کسینوسی: این معیار برای محاسبه شباهت بر اساس زاویه بین دو بردار ویژگی عمل می‌کند. با فرض دو بردار ویژگی M و N ، فاصله کسینوسی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_{\cos} = 1 - \frac{(M \times N)}{(\|M\| \times \|N\|)} \quad (۳)$$

که در اینجا $M \times N$ نمایانگر ضرب داخلی بین دو بردار است و $\|M\| \times \|N\|$ نمایانگر طول بردارها هستند [۱۸]و[۱۹].

شباهت جاکارد: این معیار برای محاسبه شباهت بین دو مجموعه عمل می‌کند. برای دو مجموعه M و N ، شباهت جاکارد به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$similarity = \frac{|M \cap N|}{|M \cup N|} \quad (۴)$$

که $|M \cap N|$ تعداد عناصر مشترک مجموعه‌ها و $|M \cup N|$ تعداد عناصر کل مجموعه‌ها را نشان می‌دهد.

۳-۱- ارزیابی زمان اجرا با مدل‌های دینامیک سیستم

ارزیابی زمان اجرا یکی از جنبه‌های حیاتی در طراحی و پیاده‌سازی مسیریابی هوشمند برای پهپادهای ناهمگن در مأموریت‌های شهری با استفاده از الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته است. زمان اجرا نشان‌دهنده میزان منابع موردنیاز برای اجرای الگوریتم در یک‌زمان مشخص است و می‌تواند تأثیر مستقیمی بر بهینگی و کارایی مسیریابی پهپادها داشته باشد.

با توجه به پیچیدگی محیط‌های شهری و تعداد زیادی از پهپادهای ناهمگن که در آن‌ها به کار گرفته می‌شوند، انجام ارزیابی دقیق زمان اجرا بسیار اهمیت دارد. زمان اجرای الگوریتم‌های مسیریابی می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کارایی و عملکرد کلی سیستم داشته باشد.

یکی از مدل‌های پویای سیستم که می‌توانند در این ارزیابی مورد استفاده قرار بگیرد، مدل‌های معادلات تفاضلی یا تفاضلی - انتگرالی هستند. این مدل‌ها معمولاً متغیرها و پارامترهای مسیریابی را به‌صورت پویا مدل می‌کنند و تغییرات زمانی آن‌ها را با استفاده از معادلات ریاضی توصیف می‌کنند.

(۵)

$$T = f\left(V, L, \alpha, \beta, \gamma\right)$$

که در آن:

T نمایانگر زمان اجرا است،

V سرعت پهپادها،

L مسافت مورد نظر برای مسیریابی،

α پارامترهای مرتبط با ویژگی‌های محیطی مانند ترافیک یا موانع،

β پارامترهای مرتبط با ویژگی‌های پهپادها مانند ظرفیت باتری و سرعت،

γ پارامترهای مرتبط با ویژگی‌های مسیریابی مانند دقت موردنیاز و شرایط محیطی است.

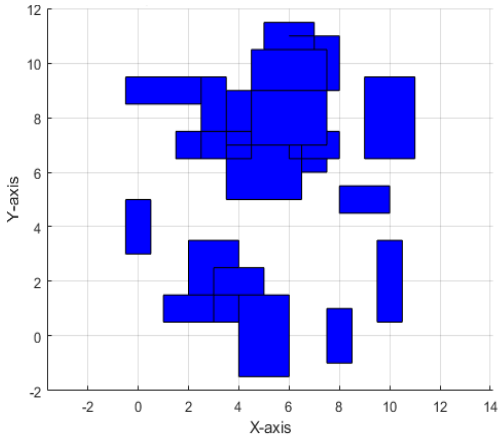
این فرمول می‌تواند با استفاده از داده‌های ورودی مربوط به مسیریابی و ویژگی‌های محیطی و پهپادها، به طور دقیق‌تر محاسبه و ارزیابی زمان اجرا را انجام دهد. به‌عنوان مثال، با تغییر سرعت پهپادها یا مسافت‌های موردنظر برای مسیریابی، می‌توان تأثیر آن‌ها بر زمان اجرا را محاسبه کرد و ارزیابی دقیق‌تری از کارایی الگوریتم‌های مسیریابی داشت.

۳-۲- مکانیسم ایجاد ماتریس محیط شهری

در زمینه برنامه‌ریزی مسیر هوشمند برای پهپادهای ناهمگن در محیط‌های غیریکنواخت، ایجاد ماتریس محیط شهری یک مرحله اساسی و حیاتی است. این ماتریس شامل اطلاعات مختلفی از جمله ساختار شهر، موقعیت موانع، مسیرهای ممکن، مناطق اقامتی و ترافیک می‌شود که توسط الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته، تجزیه و تحلیل می‌شوند و ساخته می‌شوند.

برای ایجاد ماتریس محیط شهری، در ابتدا داده‌های مربوط به ساختار شهر و موقعیت موانع جمع‌آوری می‌شوند. سپس الگوریتم‌های خوشه‌بندی انطباقی مناطق مختلف شهر را بر اساس ویژگی‌ها یا فواصل مشابه به گروه‌های کوچک‌تر یا خوشه‌ها تقسیم می‌کنند. این خوشه‌ها می‌توانند مناطقی را که ویژگی‌های مشابهی مانند ترافیک یا شرایط محیطی مشابه دارند را دسته‌بندی کنند.

سپس با ادغام اطلاعات از خوشه‌ها، یک ماتریس محیط شهری مطابق شکل ۲ تشکیل می‌شود که شامل جزئیاتی از مسیرهای ممکن، موانع موجود، نقاط ترافیکی، مناطق اقامتی و سایر جزئیات محیط شهری است. این ماتریس به عنوان ورودی برای الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر استفاده می‌شود و نقش حیاتی در انتخاب بهترین



شکل (۲): محیط شهری ایجاد شده در نرم افزار MATLAB

جدول (۱): مشخصات فنی و قیود فیزیکی پهپادهای ناهمگن مورد استفاده در مسئله مسیریابی

شماره پهپاد	نوع پهپاد	وزن (کیلوگرم)	برد (کیلومتر)	قید زمانی مأموریت (دقیقه)	حسگرها	محدودیت دینامیکی حرکت (کیلومتر بر ساعت)	کاربرد اصلی
۱	کواد کوپتر	۱.۲	۵	۲۵	دوربین HD، GPS	۴۰	نظارت بر ترافیک
۲	هگزا کوپتر	۲.۸	۱۰	۳۵	دوربین حرارتی، LIDAR	۳۵	نقشه برداری سه بعدی
۳	تری کوپتر	۱.۵	۷	۳۰	دوربین HD، حسگر مادون قرمز	۴۵	جستجو و نجات
۴	اوکتا کوپتر	۴.۰	۱۵	۵۰	دوربین 4 K، LIDAR	۳۰	بررسی زیرساخت‌ها

مسیرها برای پهپادها در ماموریت‌های شهری ایفا می‌کند. بنابراین، مکانیسم ایجاد ماتریس محیط شهری با استفاده از الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته، اهمیت ویژه‌ای در افزایش کارایی و دقت در انتخاب مسیرهای مناسب برای پهپادها دارد.

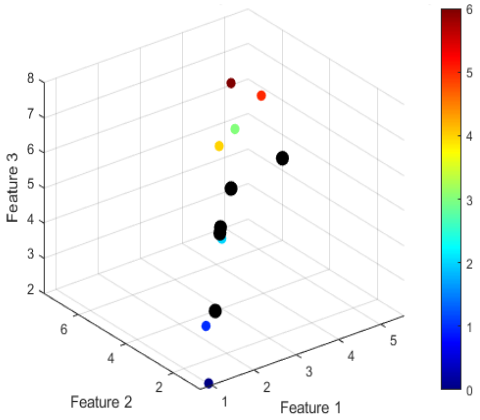
۳-۳- محدودیت‌های فیزیکی واقعی پهپادها

به‌منظور درنظرگرفتن محدودیت‌های فیزیکی واقعی پهپادهای ناهمگن در فرایند خوشه‌بندی و مسیریابی، مشخصات فنی هر پهپاد مطابق جدول شماره ۱ تعریف شده است. پارامترهایی نظیر برد پروازی و مدت‌زمان پرواز به‌عنوان محدودیت انرژی، سرعت پرواز به‌عنوان قید دینامیکی، و وزن پهپاد به‌عنوان عامل مؤثر بر مصرف انرژی و مانورپذیری در تصمیمات مسیریابی لحاظ شده‌اند.الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشنهادی با بهره‌گیری از این قیود فیزیکی، مسیرها و مأموریت‌ها را به‌گونه‌ای تخصیص می‌دهد که قابلیت اجرای عملی توسط هر پهپاد حفظ شود، به‌ویژه در سناریوهای شهری با شرایط عملیاتی متغیر.

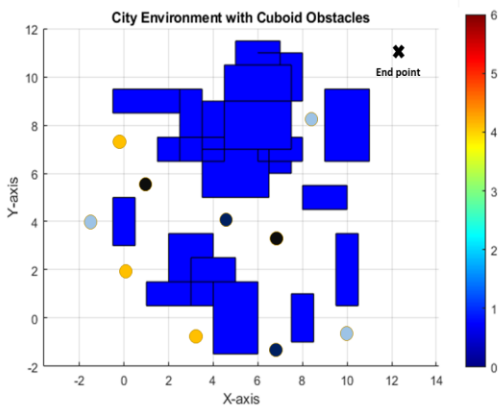
۴- نتایج شبیه‌سازی

به‌طورکلی، در شکل ۴ مربوط به الگوریتم مسیریابی هوشمند مبتنی‌بر الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته برای مسیرهای پهپادها که در نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی شده، می‌توانیم به عناصر زیر توجه کنیم: نمونه‌ها: نقاط روی نمودار نشان‌دهنده نمونه‌ها هستند. هر نمونه با یک نقطه روی نمودار نمایش داده می‌شود. مکان هر نقطه بر اساس ویژگی‌های ۱، ۲ و ۳ نمونه تعیین می‌شود. برای مثال، اگر یک نمونه ویژگی‌های (۲٫۵، ۳٫۵، ۴) را داشته باشد، نقطه متناظر با این نمونه در مکانی که محور x برابر ۲٫۵، محور y برابر ۳٫۵ و محور z برابر ۴ قرار دارد .

رنگ‌بندی: رنگ نقاط روی نمودار بر اساس ویژگی چهارم نمونه‌ها تعیین می‌شود. با استفاده از نمودار رنگی * به نام"jet" ، مقادیر ویژگی چهارم نمونه‌ها به رنگ‌های مختلف نگاشت می‌شوند. این نمودار رنگی به مشاهده و تمییز بخش‌های مختلف داده‌ها کمک می‌کند.



شکل (۳): مکانیسم خوشه‌بندی چهاربعدی برای پهپادهای ناهمگن



شکل (۴): اعمال خوشه بندی ایجاد شده پهپادهای ناهمگن به محیط غیریکنواخت

طبق شکل ۳ مراکز خوشه‌ها با نقاط سیاه بزرگ روی نمودار مشخص شده‌اند. این نقاط نشان‌دهنده مکان مراکز خوشه‌ها در فضا هستند. مراکز خوشه‌ها بر اساس میانگین موقعیت نمونه‌های متعلق به هر خوشه محاسبه می‌شوند. برای مثال، اگر یک خوشه شامل چند نمونه با مکان‌های (۳، ۴، ۴)، (۳٫۵، ۵، ۶) و (۳٫۵، ۴٫۵، ۸) باشد، مرکز این خوشه در مکانی که محور x برابر ۳٫۳۶۶۶، محور y برابر ۴٫۸۳۳۳ و محور z برابر ۶٫۶۶۶۶ قرار دارد.محدوده محورها: محورهای x و y نمودار با محدوده‌های خاصی نشان داده شده‌اند از ۰٫۷۲ تا ۵٫۵۶ برای محور x و از ۰٫۸۵ تا ۷٫۴۵ برای محور y این محدوده‌ها نمایش می‌دهند که نمونه‌ها در چه بازه‌ای از مقادیر ویژگی‌های ۱ و ۲ قرار دارند.استفاده از این نمودار سه‌بعدی با رنگ‌بندی و مراکز خوشه‌ها مطابق شکل ۴، به ما کمک می‌کند تا توزیع داده‌ها و مکان خوشه‌ها را به طور دقیق‌تری درک کنیم و نتایج خوشه‌بندی را به‌صورت بصری مشاهده کنیم و پارامترهای اصلی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها در جدول شماره ۲ مشخص شده‌اند.

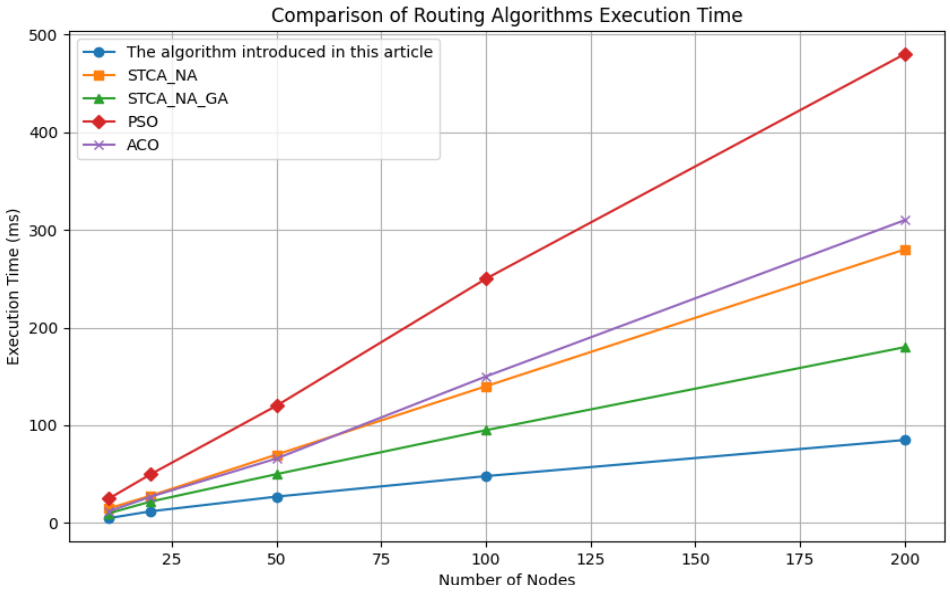
رزیابی تأثیر الگوریتم پیشنهادی بر کاهش زمان اجرا در مسیریابی

در این بخش، تأثیر الگوریتم پیشنهادی بر کاهش زمان اجرا در مسیریابی ارزیابی می‌شود. این ارزیابی با استفاده از مقایسه زمان

اجرای الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های موجود صورت می‌گیرد.

یکی از روش‌های ارزیابی تأثیر الگوریتم پیشنهادی بر کاهش زمان اجرا، مقایسه زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های موجود در محیط شبیه‌سازی نرم‌افزار MATLAB است. در این روش، ابتدا

* Color map



شکل(۵): نمایش تغییرات زمان اجرای مسیریابی الگوریتم معرفی شده در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها

الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم‌های موجود برای مسیریابی در شبیه‌سازی پیاده‌سازی می‌شوند. سپس با اجرای شبیه‌سازی بر روی داده‌های مختلف و تحت شرایط متفاوت، زمان اجرای هر الگوریتم محاسبه و با هم مقایسه می‌شود. با مقایسه زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های موجود، تأثیر الگوریتم پیشنهادی بر کاهش زمان اجرا بررسی می‌شود.

جدول (۲): پارامترهای اصلی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها

توضیحات	مقدار	نمادها
تعداد خوشه‌ها	۵	Y
حداکثر تعداد تکرار	۱۰۰	MaxIter
شرط همگرایی	۰.۰۰۱	Epsilon
حداقل تعداد نمونه‌ها در هر خوشه	۵	MinSamples
تعداد پهپادهای ناهمگن	۱۰	N
داده‌های مربوط به مختصات هر خوشه	۱۰ پهپاد با چهار ویژگی	Data

نمودار رسم شده (شکل۵)، مقایسه‌ی زمان اجرای پنج الگوریتم مختلف مسیریابی با توجه به تعداد گره‌های شبکه را نشان می‌دهد. این الگوریتم‌ها شامل الگوریتم معرفی‌شده در این مقاله، STCA_NA، STCA_NA_GA، PSO و ACO هستند. هر یک از این الگوریتم‌ها دارای پیچیدگی‌های محاسباتی و کارایی متفاوتی است که در نمودار ۵ به خوبی نشان داده شده‌اند. الگوریتم معرفی شده در این مقاله، زمان اجرای کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد که نشان‌دهنده کارایی بالاتر آن است. به طور خاص، با افزایش تعداد گره‌ها، زمان اجرای آن به طور نسبتاً ملایمی افزایش می‌یابد که در ۱۰ گره: ۵ میلی‌ثانیه و در ۲۰۰ گره: ۸۵ میلی‌ثانیه، این نشان می‌دهد که الگوریتم معرفی‌شده در مقاله دارای پیچیدگی زمانی کم‌تری است و بهینه عمل می‌کند. در حالی‌که به ترتیب در الگوریتم STCA_NA، ۱۰گره: ۱۵ میلی‌ثانیه و در ۲۰۰ گره: ۲۸۰ میلی‌ثانیه و در الگوریتم STCA_NA_GA، ۱۰ گره: ۱۰ میلی‌ثانیه و در ۲۰۰ گره: ۱۸۰ میلی‌ثانیه، در الگوریتم PSO، ۱۰ گره: ۲۵ میلی‌ثانیه و در ۲۰۰ گره: ۴۸۰ میلی‌ثانیه و در الگوریتم ACO، ۱۰گره: ۱۲ میلی‌ثانیه و در ۲۰۰ گره: ۳۱۰ میلی‌ثانیه است. با توجه به نمودار و تحلیل داده‌ها، الگوریتم معرفی‌شده در مقاله کارایی بهتری در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها دارد، خصوصاً در شبکه‌های بزرگ با تعداد گره‌های بیشتر. این موضوع نشان‌دهنده این است که این الگوریتم می‌تواند در کاربردهای عملی که نیاز به پردازش سریع دارند، بسیار مؤثر باشد. در مقابل، الگوریتم‌های PSO و ACO که از روش‌های مبتنی بر طبیعت و جستجوی تصادفی استفاده می‌کنند، زمان اجرای بسیار بالاتری دارند و برای کاربردهایی که نیاز به بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ دارند، ممکن است مناسب نباشند. این تحلیل نشان می‌دهد که انتخاب الگوریتم مناسب برای مسائل مسیریابی می‌تواند تأثیر بسزایی در کارایی سیستم داشته باشد و الگوریتم‌های بهینه مانند آنچه در این مقاله معرفی شده‌اند، می‌توانند بهره‌وری بالاتری را فراهم کنند.

۴-۱- ملاحظات پیاده‌سازی بلادرنگ و محدودیت‌های پردازشی

در سامانه‌های واقعی پهپادی، الگوریتم‌های مسیریابی علاوه بر دقت و کارایی، باید از نظر زمان اجرا و مصرف منابع پردازشی نیز با محدودیت‌های سخت‌افزارهای onboard سازگار باشند. پردازنده‌های مورد استفاده در پهپادها معمولاً دارای توان پردازشی و حافظه محدود

بوده و اجرای الگوریتم‌های سنگین و متمرکز در آن‌ها با چالش مواجه است. الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته پیشنهادی در این مقاله به‌گونه‌ای طراحی شده است که عمدتاً بر تصمیم‌گیری‌های محلی، خوشه‌بندی پویا و به‌روزرسانی تدریجی مسیرها متکی است. این ویژگی موجب می‌شود از انجام محاسبات پیچیده سراسری و تکرارشونده جلوگیری شده و سربار محاسباتی الگوریتم به‌طور قابل‌توجهی کاهش یابد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نیز نشان می‌دهد زمان اجرای الگوریتم در مقایسه با روش‌های مرجع به‌طور محسوسی کمتر است که این امر، قابلیت اجرای بلادرنگ آن را تقویت می‌کند. با توجه به ساختار الگوریتم، پیاده‌سازی آن بر روی پردازنده‌های متداول مورد استفاده در پهپادها، نظیر پردازنده‌های مبتنی بر معماری ARM و سامانه‌های تعبیه‌شده کم‌مصرف، امکان‌پذیر به نظر می‌رسد. هرچند، ارزیابی دقیق زمان اجرای واقعی الگوریتم در بستر سخت‌افزارهای واقعی و یا محیط‌های Hardware-in-the-Loop می‌تواند تصویر جامع‌تری از عملکرد بلادرنگ آن ارائه دهد که این موضوع به‌عنوان یکی از محورهای پژوهشی مهم در کارهای آتی مدنظر قرار گرفته است.

۴-۲- تحلیل عملکرد الگوریتم در شرایط نامطمئن و پویا

در محیط‌های عملی، عملکرد الگوریتم‌های مسیریابی پهپادها به‌شدت تحت تأثیر عواملی نظیر موانع پویا، تغییرات ناگهانی محیط، نویز حسگرها و تأخیرهای ارتباطی قرار می‌گیرد. نادیده گرفتن این عوامل می‌تواند منجر به کاهش پایداری و قابلیت اطمینان مسیرهای تولیدشده شود. الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشنهادی به‌دلیل ماهیت پویا و ساختار انعطاف‌پذیر خود، توانایی سازگاری با تغییرات محیطی را داراست. در این الگوریتم، خوشه‌بندی و مسیریابی به‌صورت بازپیکربندی‌پذیر انجام می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در صورت بروز تغییرات ناگهانی مانند ظهور موانع متحرک یا تغییر شرایط محیطی، مسیرها به‌سرعت اصلاح می‌شوند. این ویژگی موجب افزایش پایداری سیستم در مواجهه با عدم قطعیت‌های محیطی می‌گردد. علاوه بر این، تأثیر نویز حسگرها و تأخیرهای ارتباطی به‌صورت غیرمستقیم از طریق به‌روزرسانی‌های تطبیق‌پذیر کاهش می‌یابد، زیرا تصمیم‌گیری‌ها به داده‌های لحظه‌ای و محلی متکی هستند و وابستگی کمتری به تبادل اطلاعات سراسری دارند. نتایج شبیه‌سازی‌ها و تحلیل کیفی انجام‌شده نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی از انعطاف‌پذیری مناسبی در شرایط نامطمئن برخوردار است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پهپادها به گروه‌هایی با خصوصیات مشابه تقسیم می‌شوند و سپس هر گروه با الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته، مسیریابی مناسب برای مأموریت خود را انجام می‌دهند. این روش از الگوریتم خوشه‌بندی تطبیقی استفاده می‌کند تا به طور هوشمندانه مسیر پهپادها را در محیط‌های شهری تعیین کرده و مأموریت‌های مختلف را اجرا کند. با استفاده از خوشه‌بندی تطبیقی بر اساس ویژگی‌های محیطی، پهپادها می‌توانند به‌دقت و سرعت به تغییرات محیطی واکنش نشان دهند و از مسیریابی بهینه برای دستیابی به اهداف مأموریتی خود بهره‌مند شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از این روش مسیریابی باعث بهبود عملکرد و کارایی پهپادها در محیط‌های غیریکنواخت می‌شود، زمان اجرا را نسبت به روش‌های رایج دیگر کاهش می‌دهد و به‌طورکلی کارایی پهپادها را افزایش می‌دهد. هدف این مقاله ارائه یک پیشرفت قابل توجه در زمینه مسیریابی پهپادها در محیط‌های شهری است که کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های امنیتی، نظارتی و ارتباطات دارد. با استفاده از الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته، ابتدا پهپادها بر اساس ویژگی‌های مشابه خود به خوشه‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند. سپس هر خوشه با درنظرگرفتن محدودیت‌های مسیریابی در محیط شهری، بهترین مسیر را برای اجرای مأموریت‌های خود انتخاب می‌کند. این الگوریتم به‌ویژه در مواجهه با محیط‌های شهری پیچیده و پر از موانع، مفید است، زیرا مسیریابی هوشمندانه و تنظیم شده باعث افزایش دقت، کارایی و امنیت عملیات می‌شود. باتوجه به مأموریت‌هایی شهری که اغلب نیازمند دقت بالا و حرکت پویا هستند، استفاده از مسیریابی هوشمند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این رویکرد به پهپادها اجازه می‌دهد تا بصورت بی‌درنگ به تغییرات محیطی پاسخ دهند و مسیر خود را با توجه به شرایط فعلی بهینه‌سازی کنند. از این رو، از کارایی و انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار خواهند بود که در انجام مأموریت‌های پیچیده و حساس اهمیت زیادی دارد. با توجه به نیاز به دقت و سرعت در محیط‌های غیریکنواخت، استفاده از الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشرفته در مسیریابی پهپادها علاوه بر افزایش کارایی و دقت، منجر به کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد کلی سیستم می‌شود. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان یک راهکار نوآورانه و موثر برای مدیریت پهپادها در ماموریت‌های شهری مورد استفاده قرار گیرد و نقش مهمی در افزایش کارایی و امنیت عملیات داشته باشد.

۵-۱-کارهای آتی و توسعه‌های پیشنهادی

برای استفاده گسترده از الگوریتم تطبیق‌پذیر پیشنهادی در کاربردهای شهری واقعی، ادغام آن با داده‌های شهری و سامانه‌های اطلاعاتی پیشرفته می‌تواند نقش مهمی ایفا کند. به‌طور خاص، اتصال الگوریتم به نقشه‌های سه‌بعدی شهری، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و داده‌های ترافیک هوایی می‌تواند موجب افزایش دقت، ایمنی و کارایی مسیریابی پهپادها شود. چنین ادغامی امکان درنظرگرفتن ساختارهای شهری، مناطق پرخطر، محدودیت‌های پروازی و ترافیک هوایی را در فرآیند تصمیم‌گیری فراهم کرده و مسیر را برای استقرار الگوریتم در چارچوب شهرهای هوشمند هموار می‌سازد. این موضوع

به‌عنوان یکی از محورهای اصلی توسعه آتی الگوریتم پیشنهادی در نظر گرفته شده است.

[1] Sayyadi, H., Mohassel Feghhi, M., Atashbar, M., Nangir, M., & Sayyadi, J. (2024). Efficient four-dimensional routing planning of heterogeneous drones utilizing the fuzzy clustering algorithm in complex entropy environments. TABRIZ JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING.

[2] L. Fathollahi, M. M. Feghhi, and M. Atashbar, "Energy optimization for full-duplex wireless-powered IoT networks using rotary-wing UAV with multiple antennas," Computer Communications ", vol. 215, pp. 62–73, 2024. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.12.011.

[3] Sayyadi, H., Feghhi, M. M., Nangir, M., & Sayyadi, J. (2025, April). Improving UAV-Based Monitoring of Solar Power Plants Using Coverage Path Planning Model with Adaptive Learning Algorithm. In 2025 10th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM) (pp. 1-7). IEEE.

[4] Hajian E, khayyambashi M R, movahedinia N. SDN-Improved LEACH: A new energy-aware routing algorithm to increase life time in software defined wireless networks. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2023; 20 (3) :117-124

[5] Maleki, F., Jamali, M. A. J., & Heidari, A. (2025). Unmanned aerial vehicle routing based on frog-leaping optimization algorithm. Scientific Reports, 15(1), 11249.

[6] Sayyadi, J., Nangir, M., Feghhi, M. M., & Sayyadi, H. (2025, April). Optimal Management of Solar Energy Generation Using Derivatives of Irradiation Angle Data with the Gradient Boosting Algorithm. In 2025 10th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM) (pp. 1-6). IEEE.

[7] Zhang, Jie, Hanlin Sheng, Qian Chen, Han Zhou, Bingxiong Yin, Jiacheng Li, and Mengmeng Li. "A Four-dimensional space-time automatic obstacle avoidance trajectory planning method for multi-UAV cooperative formation flight." Drones 6, no. 8 (2022): 192.

[8] Sayyadi, J., Nangir, M., Feghhi, M. M., & Sayyadi, H. (2025). Utilizing Model-Free Reinforcement Learning for Optimizing Secure Multi-Party Computation Protocols. arXiv preprint arXiv:2510.07814.

[9] Rovira-Sugranes, Arnau, Abolfazl Razi, Fatemeh Afghah, and Jacob Chakareski. "A review of AI-enabled routing protocols for UAV networks: Trends, challenges, and future outlook." Ad Hoc Networks" 130 (2022): 102790.

[10] Chen, Jinchao, Fuyuan Ling, Ying Zhang, Tao You, Yifan Liu, and Xiaoyan Du. "Coverage path planning of heterogeneous unmanned aerial vehicles based on ant colony system." Swarm and Evolutionary Computation 69 (2022): 101005.

[11] Chen, Jinchao, Chenglie Du, Ying Zhang, Pengcheng Han, and Wei Wei. "A clustering-based coverage path planning method for autonomous heterogeneous UAVs." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 23, no. 12 (2021): 25546-25556.

[12] Ikram, M., & Sroufe, R. (2025). A novel sequential block path planning method for 3D unmanned aerial vehicle routing in sustainable supply chains. Supply Chain Analytics, 9, 100094.

[13] Duan, P., Fu, X., Hu, J., Zhou, J., & Guo, P. (2026). Path planning for UAV-based construction safety inspection under spatiotemporal interference from tower cranes. Automation in Construction, 182, 106762.

[14] Cao, Z. (2025). Simulation investigation of autonomous route planning for unmanned aerial vehicles based on an improved genetic algorithm. Neural Computing and Applications, 37(5), 3343-3354.

[15] Fei, W. A. N. G., Zhang, H., Sen, D. U., Mingzhuang, H. U. A., & Zhong, G. (2025). C-SPPO: A deep reinforcement learning framework for large-scale dynamic logistics UAV routing problem. Chinese Journal of Aeronautics, 38(5), 103229.

[16] Sorkhi Asbaghi, S., Mohassel Feghhi, M., & Musevi Niya, J. (2021). Resource Allocation for Secure Ultra-Reliable Low-Latency-Communication in IoT Applications. Journal of Communication Engineering, 10(2), 243-260.

[17] Sheltami, T., Ahmed, G., Ghaleb, M., & Mahmoud, A. (2025). UAV Path Planning and Trajectory Optimization: A Comprehensive Survey. Arabian Journal for Science and Engineering, 1-41.

[18] Hajian E, khayyambashi M R, movahedinia N. SDN-Improved LEACH: A new energy-aware routing algorithm to increase life time in software defined wireless networks. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2023; 20 (3) :117-124.

[19] mehboodi A, Nezamabadi-pour H, Soleimanpour-moghadam M. Multi-robot Path Planning in a 3D Environment by Modified Particle Swarm Optimization Algorithm. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2022; 19 (3) :163-174.