نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی
سال بیست و هشتم، شماره اول، بهار و تابستان 1405

تخصیص و مدیریت منابع پهپاد مبتنی بر الگوریتم‌های همزیستی

بهنام درستکار یاقوتی[1]، حکیمه مظاهری[*2]، علی نوراله[3]

1- استادیار، گروه فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع علوم انتظامی امین، تهران، ایران

2- دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

3- استادیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

(دریافت مقاله: 1404/06/14 تاریخ پذیرش: 1404/08/29)

چکیده

تخصیص منابع در سامانه‌های چندپهپادی به‌دلیل محدودیت توان پردازشی، حافظه و پهنای باند ارتباطی، از چالش‌های اساسی در مأموریت‌های هوشمند محسوب می‌شود. تخصیص غیربهینه‌ی این منابع می‌تواند منجر به تکرار داده، افزایش هزینه محاسباتی و کاهش دقت پوشش محیطی شود. این پژوهش با هدف رفع این چالش، الگوریتمی الهام‌گرفته از تعاملات زیستی با عنوان الگوریتم همزیستی CORES را معرفی می‌کند که با بهره‌گیری از ساختار داده‌ی چهاردرخت پویا و مدل‌سازی رفتار هم‌زیستان در طبیعت، فرایند تخصیص منابع را به‌صورت تطبیقی بهینه می‌سازد. در شبیه‌سازی‌ها، داده‌های محیطی مصنوعی شامل نواحی زمینی، آبی و پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گرفت و 150 اجرای مستقل تحت ترکیب‌های مختلف پارامترهای میدان دید، آستانه‌ی تصمیم و بودجه‌ی حافظه انجام شد. نتایج کمی نشان داد که الگوریتم CORES توانست میانگین شاخص کیفیت داده را تا 18٪ و شاخص انطباق مکانی را تا 23٪ نسبت به روش‌های پایه بهبود دهد. از نظر کیفی نیز، توزیع یکنواخت‌تر داده‌ها و کاهش هم‌پوشانی فضایی به‌دست آمد. این نتایج بیانگر آن است که الگوریتم CORES با الهام از تعاملات زیستی می‌تواند تخصیص منابع را در سامانه‌های پهپادی به‌صورت پویا، کارآمد و سازگار با تغییرات محیطی انجام دهد.

واژه‌های کلیدی: *تخصیص منابع؛ چهاردرخت پویا؛ پهپادها؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ مدیریت داده‌های محیطی.*

UAV Resource Allocation and Management Based on Symbiotic Algorithms

1st Behnam & dorostkar yaghoti, 2nd Hakimeh & mazaheri, 3nd Ali & nourollah

Abstract

Resource allocation in multi-UAV systems is one of the fundamental challenges in intelligent mission planning due to the limited processing power, memory capacity, and communication bandwidth of unmanned aerial vehicles. Inefficient allocation of these resources can lead to data redundancy, increased computational cost, and reduced spatial accuracy. To address this challenge, this study introduces a biologically inspired CORES algorithm, which integrates dynamic quadtree data structures with coexistence modeling of living organisms to achieve adaptive and balanced resource utilization. In the simulation experiments, synthetic environmental datasets representing terrestrial, aquatic, and vegetated areas were used. A total of 150 independent runs were performed under varying combinations of field-of-view, decision threshold, and memory budget parameters. Quantitative results show that CORES improves the average data quality index by up to 18% and the spatial overlap index by up to 23% compared with baseline methods. Qualitative observations also indicate more uniform data distribution and better spatial coverage. Overall, CORES demonstrates strong adaptability and efficiency for dynamic resource allocation in UAV-based systems.

Key words: *Resource Allocation; Dynamic Quadtree; UAVs; Multi-Objective Optimization; Environmental Data Management*

* نویسنده پاسخگو: حکیمه مظاهری تلفن: 09120748239 پست الکترونیک: hakimeh.mazaheri@gmail.com

این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس از آدرس https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمایید.

مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از سامانه‌های پهپادی در مأموریت‌های هوشمند پلیس، نظیر پایش محیطی، کشاورزی دقیق، نقشه‌برداری و عملیات امداد، رشد چشمگیری یافته است[1]. افزون بر این، پژوهش‌های اخیر در حوزه‌ی هوش مصنوعی و بینایی ماشین نیز نشان داده‌اند که ترکیب سامانه‌های پهپادی با الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌تواند دقت و سرعت تصمیم‌گیری را در مأموریت‌های انتظامی به‌طور چشمگیری افزایش دهد [2 و 3]. با این حال، افزایش تعداد پهپادها[1] در یک مأموریت مشترک موجب بروز چالش‌های متعددی در زمینه‌ی مدیریت و تخصیص منابع[2] می‌شود. محدودیت انرژی، توان پردازشی، حافظه و پهنای باند ارتباطی در هر پهپاد، باعث می‌شود هماهنگی میان آن‌ها به مسئله‌ای پیچیده و چندهدفه تبدیل گردد. تخصیص نامناسب منابع می‌تواند منجر به تداخل وظایف، تکرار داده، کاهش کیفیت مأموریت و هدررفت انرژی شود. ازاین‌رو، توسعه‌ی الگوریتم‌هایی که قادر باشند تخصیص منابع را به‌صورت پویا، بهینه و هماهنگ میان پهپادها انجام دهند، ضرورتی کلیدی در طراحی سامانه‌های چندپهپادی به شمار می‌رود. یکی از چالش‌های اساسی در دنیای امروز، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری[3] و الهام‌گرفته از طبیعت[4] برای حل مسائل بهینه‌سازی است. بیشتر الگوریتم‌های فراابتکاری موجود از فرآیندها و پدیده‌های طبیعی همچون فرایندهای تکاملی، رفتاری جمعی یا پدیده‌های فیزیکی الهام گرفته‌اند. با این حال، می‌توان به دنبال رفتارهای خاص‌تری در طبیعت بود که به سیاست‌های اجتماعی پیچیده در میان گونه‌های حیوانی یا گیاهی مربوط می‌شوند. به طور خاص، تعاملات بین‌گونه‌ای نمونه‌ای از این رفتارها هستند. این تعاملات لزوماً همواره به‌صورت همکاری در یک سیستم زیست‌محیطی ایجاد نشده‌اند، بلکه می‌توانند رقابتی بوده یا با هدف مدیریت منابع محدود میان گونه‌های مختلف شکل گرفته باشند. طبیعت مملو از مثال‌های متنوعی از بهینه‌سازی منابع در شرایط رقابتی و مشارکتی است. این تعاملات می‌توانند الهام‌بخش طراحی الگوریتم‌های نوین برای حل مسائل بهینه‌سازی در حوزه‌های گوناگون باشند. برای نمونه، در میان گونه‌های گیاهی مکانیزم‌های متنوعی برای دسترسی به منابع محدود وجود دارد. در جنگل‌ها، درختان و گیاهان برای جذب نور، آب و مواد مغذی از خاک با یکدیگر رقابت می‌کنند. برخی گونه‌ها با ریشه‌های عمیق‌تر منابع آب را از لایه‌های زیرین خاک جذب می‌کنند، در حالی که برخی دیگر با گسترش سطح برگ‌ها نور بیشتری دریافت می‌کنند [4]. چنین مکانیزم‌هایی می‌توانند به طراحی الگوریتم‌های جدیدی برای تخصیص منابع در محیط‌های پیچیده و پویا منجر شوند. در اکوسیستم‌های کشاورزی نیز تعاملات غیرمستقیم میان گونه‌ها برای مقابله با آفات مشاهده می‌شود؛ به عنوان مثال، برخی گیاهان با ترشح مواد شیمیایی از خود در برابر آفات دفاع می‌کنند و دیگر گونه‌ها نیز از این اثر سود می‌برند [5]. چنین تعاملاتی می‌توانند الهام‌بخش الگوریتم‌هایی برای مدیریت منابع در شرایط تعارض و رقابت باشند. این الگوها همچنین می‌توانند به تعاملات پیچیده‌تر میان شکارچیان و طعمه‌ها یا تکامل رفتارهای انتخابی در گونه‌های گیاهی برای دستیابی به منابع محدود اشاره داشته باشند. در بسیاری از زیست‌بوم‌ها، شکارچیان و طعمه‌ها همواره در رقابتی پویا برای بقا و دستیابی به منابع هستن [6]. به عنوان مثال، در دریا کوسه‌ها و ماهی‌ها به طور هم‌زمان در جستجوی منابع غذایی به رقابت می‌پردازند. چنین سازوکارهایی می‌توانند مبنای توسعه الگوریتم‌هایی باشند که تخصیص منابع را در سیستم‌های چندعاملی با ترکیب همکاری و رقابت مدل‌سازی می‌کنند.

بدین ترتیب، مکانیزم‌های طبیعی الهام‌بخش الگوریتم‌های تخصیص منابع و رویکردهای چندعاملی هستند که نه تنها بهینه‌سازی منابع را دنبال می‌کنند، بلکه رقابت‌ها و تعاملات پیچیده بین عوامل مختلف را نیز لحاظ می‌نمایند. این پدیده‌ها نشان می‌دهند که هنوز بسیاری از رفتارهای تعاملی و پیچیده در طبیعت وجود دارند که در الگوریتم‌های فراابتکاری کنونی به طور کامل مدل‌سازی نشده‌اند. دلیل این امر، پیچیدگی ذاتی چنین تعاملاتی است که شبیه‌سازی آن‌ها نیازمند تحلیل‌های پیشرفته و شناخت عمیق از روابط زیستی است. این پدیده‌ها معمولاً در مقیاس‌های زمانی و مکانی خاص رخ می‌دهند و به پارامترهایی نیاز دارند که در الگوریتم‌های فعلی به‌سادگی قابل پیاده‌سازی نیستند. بنابراین، این حوزه‌ها همچنان می‌توانند

[1] Unmanned Aerial Vehicle
[2] Resource Allocation
[3] Metaheuristic Algorithms
[4] Nature-Inspired Algorithms

الهام‌بخش الگوریتم‌های نوآورانه برای حل مسائل بهینه‌سازی باشند.

الهام‌گیری از تعاملات بین‌گونه‌ای در طبیعت پتانسیل بالایی برای طراحی الگوریتم‌های بهینه‌سازی دارد، اما با چالش‌هایی نیز همراه است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، پیچیدگی مدل‌سازی است. بازنمایی رفتارهای پیچیده و تعاملی در طبیعت نیازمند تحلیل‌های دقیق و شناخت عمیق از روابط زیستی است، به‌ویژه زمانی که تعاملات شامل گونه‌های متعدد با رفتارهای متنوع باشند [7]. برای غلبه بر این چالش می‌توان از روش‌های مدل‌سازی پیشرفته مانند مدل‌سازی عامل‌محور بهره برد [8]. علاوه بر این، مقیاس‌پذیری الگوریتم‌ها نیز یک چالش جدی است. چنین الگوریتم‌هایی باید قادر باشند مسائل بزرگ‌مقیاس را مدیریت کنند، اما پیچیدگی محاسباتی در مدل‌سازی تعاملات میان گونه‌های متعدد می‌تواند بسیار بالا باشد [9]. رای رفع این مشکل، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و تقریب پیشنهاد شده است [10و11]. تعمیم‌پذیری الگوریتم‌ها نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی باید به گونه‌ای طراحی شوند که قابلیت استفاده در حوزه‌های مختلف را داشته باشند، زیرا الگوریتم‌هایی که تنها در یک زمینه خاص کاربرد دارند، محدودیت عملی گسترده‌ای خواهند داشت. برای افزایش تعمیم‌پذیری، روش‌های یادگیری انتقالی و یادگیری چندوظیفه‌ای می‌توانند مفید باشند [12]. در زمینه برنامه‌ریزی مسیر پهپادها نیز این مفهوم کاربرد ویژه‌ای دارد. الگوریتم‌های الهام‌گرفته از تعاملات زیستی می‌توانند برای تخصیص بهینه پهپادها به مناطق مختلف با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع و اولویت‌های مأموریت به‌کار روند [13]. به عنوان مثال، چنین الگوریتمی قادر است با لحاظ محدودیت انرژی و زمان پرواز، بهترین مسیر را برای پایش مزارع و انجام عملیات سم‌پاشی تعیین کند [14]. همچنین، الگوریتم‌های مبتنی بر نظریه بازی‌ها نیز می‌توانند برای مدل‌سازی رقابت‌ها و یافتن راه‌حل‌های بهینه مورد استفاده قرار گیرند [15].

در حوزه‌ی برنامه‌ریزی مسیر پهپادها، الگوریتم‌های الهام‌گرفته از تعاملات بین‌گونه‌ای کاربردهای متعددی دارند. یکی از مهم‌ترین این کاربردها، تخصیص منابع با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و اولویت‌ها است. مدیریت منابعی مانند انرژی، زمان پرواز و ظرفیت بار پهپاد از جمله عوامل حیاتی در اجرای موفق مأموریت‌ها محسوب می‌شود [16]. الگوریتم‌های الهام‌گرفته از رقابت میان گونه‌های گیاهی می‌توانند برای تخصیص بهینه‌ی پهپادها به مناطق مختلف، با توجه به محدودیت‌ها و اهداف متفاوت، به کار گرفته شوند. در این چارچوب، طراحی الگوریتم‌هایی که همکاری و رقابت میان پهپادهای مختلف را هم‌زمان در نظر بگیرند، امکان‌پذیر است [17]. به عنوان نمونه، چنین الگوریتمی قادر است با لحاظ محدودیت‌های منابع و اولویت ماموریت‌ها، بهینه‌ترین تخصیص پهپادها به وظایف مختلف را انجام دهد [18] بهینه‌سازی مسیر در محیط‌های پویا نیز یکی دیگر از حوزه‌های مهم کاربردی است. محیط‌های پروازی پهپادها معمولاً پویا و نامطمئن هستند و الگوریتم‌های الهام‌گرفته از تعاملات شکارچی–طعمه می‌توانند با سازگاری نسبت به تغییرات محیطی، مسیر پرواز پهپادها را به‌طور پویا بازتنظیم کنند [19]. این الگوریتم‌ها با بهره‌گیری از داده‌های حسی و مدل‌سازی پویایی محیط، شرایط لازم برای بهینه‌سازی مسیر در محیط‌های متغیر را فراهم می‌آورند [20] در مواردی که چندین پهپاد به‌طور هم‌زمان برای انجام یک مأموریت به کار گرفته می‌شوند، هماهنگی و همکاری میان آن‌ها اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. الگوریتم‌های الهام‌گرفته از همکاری بین گونه‌ها می‌توانند این هماهنگی را تسهیل کرده و به بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش زمان پرواز و افزایش کارایی کل سیستم کمک کنند [21]. چنین رویکردی اجرای مأموریت‌های گروهی را کاراتر و مطمئن‌تر می‌سازد [22]

با وجود این پیشرفت‌ها، یکی از چالش‌های اصلی در این حوزه مدیریت بهینه‌ی منابع پردازشی و حافظه در پهپادها است. داده‌های محیطی اغلب به‌صورت ناهمگن توزیع شده و اهمیت آن‌ها بسته به موقعیت و هدف مأموریت تغییر می‌کند. بنابراین، طراحی الگوریتمی که بتواند کیفیت داده‌های دریافتی را متناسب با ارزش اطلاعاتی هر ناحیه تنظیم کرده و در عین حال منابع پردازشی و حافظه را بهینه مصرف کند، ضرورتی انکارناپذیر دارد.

در این پژوهش، یک الگوریتم نوآورانه به نام CORES معرفی می‌شود که با ترکیب ساختار داده‌ی چهاردرخت پویا و الگوریتم‌های ارزش‌گذاری محیطی عمل می‌کند. این الگوریتم قادر است با تنظیم پویا پارامترهای پرواز و مدیریت داده‌های محیطی، مصرف منابع پردازشی و حافظه را بهینه‌سازی کند. الگوریتم CORES چارچوبی است که برای نخستین‌بار در این

پژوهش معرفی شده و بر مبنای شبیه‌سازی تعاملات همزیستی در طبیعت طراحی شده است. این الگوریتم با ترکیب مدل‌های الهام‌گرفته از رفتار بین‌گونه‌ای و ساختار داده‌ی چهاردرخت پویا، به تخصیص تطبیقی منابع در سیستم‌های چندعاملی می‌پردازد. ساختار آن به گونه‌ای است که پهپادها به‌عنوان عوامل زیستی فرض می‌شوند و هر یک با توجه به معیارهایی چون ارزش محیطی، تازگی داده، هم‌پوشانی فضایی و بودجه‌ی حافظه، برای دسترسی به منابع رقابت یا همکاری می‌کنند. تاکنون از CORES در قالب این پژوهش برای مدیریت داده‌های محیطی در مأموریت‌های پهپادی استفاده شده، اما چارچوب پیشنهادی آن به‌صورت بالقوه قابلیت به‌کارگیری در حوزه‌های دیگری مانند شبکه‌های حسگر بی‌سیم، پایش زیست‌محیطی و سامانه‌های اینترنت اشیا را نیز داراست. در این پژوهش، واژه‌ی "منابع" به مجموعه‌ی ظرفیت‌های محاسباتی و اطلاعاتی سامانه پهپادی اشاره دارد و شامل سه مؤلفه‌ی اصلی است : حافظه‌ی قابل استفاده برای ذخیره‌سازی داده‌ها، توان پردازشی برای تحلیل آن‌ها، و داده‌های محیطی حاصل از حسگرهای پروازی. هدف الگوریتم CORES تخصیص بهینه‌ی این منابع به‌گونه‌ای است که دقت داده و بهره‌وری سیستم به‌صورت هم‌زمان افزایش یابد.

نوآوری‌های این پژوهش در چند محور اصلی قابل‌تبیین است. نخست، الگوریتم همزیستی CORESبه‌عنوان چارچوبی نوآورانه برای تخصیص منابع در سیستم‌های پویا و چندعاملی معرفی شده است که با الهام از تعاملات زیستی، رفتار تطبیقی در تصمیم‌گیری را مدل‌سازی می‌کند. این الگوریتم با ترکیب ساختار داده‌ی چهاردرخت پویا و معیارهای ارزش‌گذاری محیطی، دقت و کارایی را در مدیریت داده‌های ناهمگن به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. افزون بر این، CORESتوانایی بهینه‌سازی هم‌زمان سه مؤلفه‌ی کلیدی ـ شامل مصرف حافظه، کیفیت داده و سربار پردازشی ـ را در مأموریت‌های پهپادی داراست. تحلیل‌های عددی انجام‌شده در محیط‌های متغیر نیز نشان می‌دهد که پارامترهای کلیدی مدل، به‌طور مستقیم بر عملکرد الگوریتم تأثیرگذارند و می‌توانند با تنظیم مناسب، منجر به افزایش پایداری و بهره‌وری سیستم شوند. در نهایت، چارچوب پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده که از قابلیت تعمیم و به‌کارگیری در سایر حوزه‌ها نظیر شبکه‌های حسگر بی‌سیم، پایش زیست‌محیطی و مدیریت داده‌های توزیع‌شده نیز برخوردار است.

در ادامه، در بخش دوم بیان مسئله و مفاهیم اولیه بیان خواهد شد؛ در بخش سوم پیشینه‌ی پژوهش مرور می‌شود. ؛ در بخش چهارم الگوریتم پیشنهادی معرفی می‌گردد. بخش پنجم به نتایج و آزمایش‌ها اختصاص دارد؛ و در نهایت در بخش پایانی نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

بیان مسئله و مفاهیم اولیه

یکی از چالش‌های کلیدی در سامانه‌های چندپهپادی، تخصیص و مدیریت بهینه‌ی منابع در حین انجام مأموریت‌های مشترک است. هر پهپاد دارای محدودیت‌هایی در توان پردازشی، ظرفیت حافظه، انرژی و پهنای باند ارتباطی است که این عوامل، تصمیم‌گیری هم‌زمان و هماهنگی میان پهپادها را به مسئله‌ای پیچیده و چندهدفه تبدیل می‌کند. در مأموریت‌های جمع‌آوری داده یا پایش محیطی، توزیع نامناسب منابع می‌تواند منجر به تکرار داده‌ها، افزایش هم‌پوشانی مسیرها و هدررفت انرژی شود. بنابراین، نیاز به رویکردی وجود دارد که بتواند با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها، تخصیص منابع را به‌صورت پویا، تطبیقی و هوشمند مدیریت کند. هدف این پژوهش، ارائه‌ی الگوریتمی الهام‌گرفته از تعاملات زیستی با عنوان CORESاست که بتواند در شرایط پویا و نامطمئن، تعادل میان مصرف منابع و کیفیت داده را برقرار سازد.

تعاملات در گونه‌های طبیعی را می‌توان به چند دسته کلی تقسیم کرد. دسته اول تعاملات رقابتی[1] هستند و زمانی رخ می‌دهد که گونه‌ها برای دسترسی به منابع محدود (مانند غذا، آب، یا قلمرو) با یکدیگر رقابت می‌کنند. برای مثال وقتی دو گونه شکارچی برای شکار یک طعمه رقابت می‌کنند. دسته دوم تعاملات همکاری[2] هستند و زمانی رخ می‌دهند که گونه‌ها با همکاری، منابع را به اشتراک می‌گذارند یا به بهبود شرایط محیطی یکدیگر کمک می‌کنند مانند پرندگانی که انگل‌ها را از بدن حیوانات بزرگ‌تر برمی‌دارند. دسته سوم تعاملات هم-زیستی[3] هستند و زمانی رخ می‌دهند که رابطه‌ای برقرار شود که در آن هر دو گونه از تعامل سود می‌برند، برای مثال قارچ‌ها و ریشه‌های گیاهان که به تبادل مواد مغذی کمک می‌کنند.

[1] Competition
[2] Cooperation
[3] Symbiosis

دسته چهارم تعاملات بر مبنای شکار و طعمه است مانند شیر و گورخر که یک گونه به‌عنوان شکارچی و دیگری به‌عنوان طعمه عمل می‌کند. دسته آخر تعاملات بر مبنای رقابت غیر مستقیم[1] است. در این حالت گونه‌ها از منابع مشترک استفاده می‌کنند، اما مستقیما با یکدیگر تعامل ندارند مانند گیاهانی که از یک منبع تغذیه می‌کنند.

در این پژوهش، هنگام بیان تعاملات زیستی در گونه‌های طبیعی، ضروری است که همکاری را از همزیستی به‌عنوان یک دسته کلی‌تر، و از رقابت با زیرشاخه‌های «رقابت مستقیم» و «رقابت غیرمستقیم» تفکیک کنیم. به‌عنوان مثال، همزیستی می‌تواند شامل همکاری متقابل باشد (مانند ارتباط زنبورعسل و گل‌ها در گرده‌افشانی) یا فقط استفاده یک‌طرفه بدون آسیب طرف مقابل (مانند زندگی ماهی »رامه» در کنار کوسه‌ها برای تغذیه از باقی‌مانده‌ی شکار). در مقابل، رقابت غیرمستقیم زمانی رخ می‌دهد که دو گونه از طریق مصرف مشترک منبع یا واسطه‌ای تأثیر منفی بر هم بگذارند بدون تماس مستقیم.

تعاملات بین گونه‌های مختلف در طبیعت به دلیل پیچیدگی و پویایی محیط زیست تحت تأثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرند. این عوامل به‌طور کلی به ویژگی‌های زیستی گونه‌ها، شرایط محیطی، و منابع موجود مرتبط هستند و شامل فاصله جغرافیایی، اهمیت و دسترسی به منابع، تراکم گونه‌ها، ویژگی‌های زیستی گونه‌ها و چرخه‌های زمانی و زیستی، تأثیر محیط و زیستگاه، در ادامه، این عوامل با جزئیات بیشتری توضیح داده خواهد شد.

فاصله جغرافیایی: یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در تعاملات، فاصله جغرافیایی بین گونه‌ها است. گونه‌هایی که به یکدیگر نزدیک‌تر هستند، احتمال بیشتری برای تعامل دارند. این تعاملات ممکن است شامل رقابت بر سر منابع، همکاری برای بقا، یا حتی روابط شکارچی-طعمه باشد. از سوی دیگر، گونه‌هایی که در فواصل دورتر قرار دارند، تأثیر متقابل کمتری بر یکدیگر دارند و گاهی تعاملات آن‌ها به صورت غیرمستقیم از طریق تغییرات اکوسیستم بروز می‌کند. تعاملات معمولا با افزایش فاصله کاهش می‌یابند، و این کاهش می‌تواند نمایی یا غیرخطی باشد. برای مثال، گونه‌های شکارچی تمایل دارند در مناطق نزدیک به طعمه‌های خود فعالیت کنند، در حالی که گونه‌های گیاهی ممکن است از طریق دانه‌ها یا گرده‌ها در فواصل دورتر تأثیرگذار باشند.

اهمیت و دسترسی به منابع: دسترسی به منابع عامل کلیدی دیگری است که بر شدت تعاملات بین گونه‌ها تأثیر می‌گذارد. منابع محدود اغلب منجر به رقابت شدیدتر می‌شوند، در حالی که منابع فراوان ممکن است تعاملات را کاهش داده یا حتی باعث همکاری بین گونه‌ها شود. زمانی که یک منبع حیاتی مانند آب در محیط کم باشد، گونه‌ها ممکن است برای دسترسی به آن رقابت کنند. این رقابت می‌تواند مستقیم (مانند نزاع بین دو شکارچی) یا غیرمستقیم (مانند کاهش منابع خاک به دلیل جذب توسط گیاهان دیگر) باشد. منابعی که از نظر کیفیت یا اهمیت بالاتر هستند (مانند شکارهای مغذی یا زیستگاه‌های امن) معمولا تعاملات شدیدتری را به همراه دارند.

تراکم گونه‌ها: تراکم جمعیت نیز نقش مهمی در تعاملات ایفا می‌کند. در مناطقی که تراکم جمعیت گونه‌ها بالاست، احتمال رقابت و تعامل مستقیم افزایش می‌یابد. این تراکم می‌تواند اثرات مختلفی داشته باشد. گونه‌هایی که در مناطقی با تراکم بالا زندگی می‌کنند، بیشتر بر سر منابع محدود رقابت می‌کنند. این موضوع به‌ویژه در اکوسیستم‌های کوچک یا محدود بیشتر دیده می‌شود. در برخی موارد، تراکم بالا می‌تواند به شکل‌گیری روابط همکاری منجر شود. به‌عنوان مثال، پرندگان مهاجر اغلب در گروه‌های بزرگ حرکت می‌کنند تا از مزایای جمعی مانند کاهش خطر شکار بهره‌مند شوند.

ویژگی‌های زیستی گونه‌ها: ویژگی‌های ذاتی گونه‌ها، مانند اندازه بدن، رفتار تغذیه‌ای، توانایی تولیدمثل، و قابلیت سازگاری با محیط، در تعیین نوع و شدت تعاملات بسیار مؤثر است. این ویژگی‌ها می‌توانند نحوه تعامل گونه‌ها با یکدیگر و محیط خود را تحت تأثیر قرار دهند. شکارچیان معمولاً بر گونه‌های ضعیف‌تر یا آسیب‌پذیرتر تمرکز می‌کنند، در حالی که گونه‌های علف‌خوار به دنبال گیاهانی با بیشترین بازده انرژی هستند. گونه‌هایی که توانایی بیشتری در سازگاری با تغییرات محیطی دارند، ممکن است نسبت به گونه‌های دیگر مزیت بیشتری در دسترسی به منابع پیدا کنند.

چرخه‌های زمانی و زیستی: تعاملات گونه‌ها اغلب وابسته به چرخه‌های زمانی خاص هستند. این چرخه‌ها شامل دوره‌های شبانه‌روزی، فصلی، یا حتی سالانه می‌شوند. برای مثال بسیاری از شکارچیان در شب فعال هستند تا از مزیت

[1] Indirect Competition

استتار تاریکی استفاده کنند، در حالی که طعمه‌ها ممکن است در طول روز فعالیت کنند. تغییرات فصلی در دسترسی به منابع مانند آب یا غذا می‌تواند شدت تعاملات را تغییر دهد. به‌عنوان مثال، در فصل خشک، رقابت برای دسترسی به منابع آبی افزایش می‌یابد.

تأثیر محیط و زیستگاه: شرایط محیطی مانند دما، رطوبت، و نوع زیستگاه نیز می‌تواند تعاملات گونه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. گونه‌هایی که در محیط‌های سخت‌تر (مانند بیابان‌ها یا قطب‌ها) زندگی می‌کنند، اغلب تعاملات پیچیده‌تری برای بقا دارند. در محیط‌هایی با منابع محدود، رقابت و همکاری ممکن است به‌شدت افزایش یابد .در محیط‌هایی با تنوع بالای زیستگاه، گونه‌ها ممکن است تعاملات کمتری داشته باشند، زیرا هر گونه به بخش خاصی از زیستگاه وابسته است.

تعاملات بین گره‌های ساختار داده چهار درخت پویا و عوامل مؤثر در آن‌ها

تخصیص منابع در سیستم‌های پیچیده یکی از چالش‌های اساسی در بسیاری از حوزه‌های علمی از جمله زیست‌شناسی و علوم رایانه است. در این پژوهش، مدلی ریاضی معرفی می‌شود که رفتار موجودات زنده در تخصیص منابع را شبیه‌سازی کرده و آن را با الگوریتمی چندهدفه به نام CORESترکیب می‌کند. هدف این الگوریتم، حل مسائل بهینه‌سازی چندمعیاره با تمرکز بر بهینه‌سازی مصرف حافظه، کیفیت داده‌های ذخیره‌شده و کاهش سربار پردازشی در مأموریت‌های پهپادی است.

الگوریتم CORES بر پایه‌ی ساختار داده‌ی چهاردرخت پویا و معیارهای ارزش‌گذاری محیطی طراحی شده و از تعاملات بین‌گونه‌ای در طبیعت الهام گرفته است. در این مدل، پهپادها مشابه گونه‌های زیستی در محیطی پویا با منابع محدود در نظر گرفته می‌شوند که باید با رقابت یا همکاری منابع موجود را بین خود تخصیص دهند. این ایده به‌ویژه در شرایط محدودیت منابع یا مأموریت‌های پیچیده کاربرد دارد و می‌تواند کارایی کلی سیستم را افزایش دهد. تعاملات میان گونه‌های طبیعی به‌عنوان الگوی اصلی در طراحی CORES در نظر گرفته شده‌اند و می‌توان آن‌ها را به پنج دسته تقسیم کرد:

- **تعاملات رقابتی :**زمانی رخ می‌دهد که گونه‌ها برای دسترسی به منابع محدود (غذا، آب یا قلمرو) با یکدیگر رقابت می‌کنند. مانند رقابت دو شکارچی برای دستیابی به یک طعمه.
- **تعاملات همکاری :**در این حالت گونه‌ها با یکدیگر همکاری می‌کنند و از مزایای جمعی بهره‌مند می‌شوند؛ برای مثال پرندگانی که انگل‌ها را از بدن حیوانات بزرگ‌تر برمی‌دارند.
- **تعاملات همزیستی :**زمانی که دو گونه در رابطه‌ای دوطرفه سود می‌برند، مانند قارچ‌ها و ریشه‌های گیاهان که به تبادل مواد مغذی کمک می‌کنند.
- **شکار و طعمه :**یکی از رایج‌ترین تعاملات که در آن یک گونه به‌عنوان شکارچی و دیگری به‌عنوان طعمه عمل می‌کند (مانند شیر و گورخر).
- **رقابت غیرمستقیم :** در این حالت گونه‌ها از منابع مشترک بهره‌مند می‌شوند اما تعامل مستقیم ندارند، مانند گیاهانی که از خاک یکسان تغذیه می‌کنند.

این دسته‌بندی به CORES کمک می‌کند تا در سناریوهای متنوع محیطی، رفتارهای رقابتی و همکاری را شبیه‌سازی کرده و در تخصیص منابع بین پهپادها از آن بهره گیرد.

عوامل مؤثر بر تعاملات: تعاملات بین‌گونه‌ای در طبیعت پیچیده و پویا هستند و تحت تأثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرند. در طراحی CORES نیز این عوامل به‌عنوان متغیرهای کلیدی در نظر گرفته شده‌اند:

- **فاصله جغرافیایی :**نزدیکی یا دوری گونه‌ها شدت تعاملات را تغییر می‌دهد. پهپادها نیز در نزدیکی اهداف (مانند مناطق با ارزش اطلاعاتی بالا) تعاملات بیشتری خواهند داشت.
- **اهمیت و دسترسی به منابع :**محدودیت منابع کلیدی مانند انرژی یا داده‌های ارزشمند باعث افزایش رقابت و تغییر در نحوه تخصیص می‌شود.
- **تراکم جمعیتی :**افزایش تراکم گونه‌ها (یا پهپادها) احتمال رقابت و تعامل مستقیم را بیشتر می‌کند، هرچند می‌تواند زمینه‌ساز همکاری نیز باشد.
- **ویژگی‌های زیستی گونه‌ها :**عواملی مانند توان سازگاری، ظرفیت ذخیره‌سازی یا مصرف انرژی تعیین می‌کنند که کدام عامل در رقابت موفق‌تر است.

- **چرخه‌های زمانی و زیستی :**تعاملات وابسته به چرخه‌های فصلی یا روزانه هستند؛ مشابه آن، پهپادها نیز در بازه‌های زمانی خاص محدودیت انرژی یا ارتباط دارند.
- **شرایط محیطی و زیستگاه :**دما، رطوبت و ویژگی‌های محیطی شدت تعاملات را تغییر می‌دهد. در مدل CORESنیز شرایط محیطی پویا بر تصمیمات تخصیص منابع اثر می‌گذارد.

تلفیق تعاملات درCORES **:** الگوریتم CORES این تعاملات و عوامل مؤثر را در قالب یک مدل ریاضی چندهدفه ترکیب می‌کند. بدین ترتیب، منابع حافظه و پردازش پهپادها متناسب با اهمیت داده‌ها و شرایط محیطی تخصیص می‌یابند. استفاده از چهاردرخت پویا امکان تقسیم‌بندی دقیق محیط و تمرکز بر نواحی با ارزش بالاتر را فراهم می‌آورد. همچنین، معیارهایی مانند تازگی داده، هم‌پوشانی مکانی و میزان منابع باقی‌مانده در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ می‌شوند. این چارچوب به الگوریتم اجازه می‌دهد تا در شرایط پویا و محدودیت منابع، تخصیص بهینه را شبیه‌سازی کرده و به کارایی بیشتر در مأموریت‌های پیچیده پهپادی دست یابد

پیشینه پژوهش

در این بخش، به مرور پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی الگوریتم‌های الهام‌گرفته از همزیستی و تعاملات زیستی برای مدیریت منابع پهپادها پرداخته می‌شود. این الگوریتم‌ها عمدتاً از اصول همکاری و رقابت در طبیعت الهام گرفته‌اند و توانسته‌اند در بهبود بهره‌وری، تخصیص منابع و هماهنگی میان پهپادها نقش مؤثری ایفا کنند. مرور حاضر تلاش دارد تا الگوریتم‌های مختلف مورد استفاده در این حوزه را شناسایی و طبقه‌بندی کرده، عملکرد آن‌ها را در سناریوهای گوناگون تحلیل و مقایسه کند، و در نهایت نقاط قوت، محدودیت‌ها و فرصت‌های تحقیقاتی آینده را برجسته سازد. این دسته‌بندی نه تنها دید جامعی از پیشرفت‌های اخیر ارائه می‌دهد، بلکه مسیر مناسبی برای پژوهش‌های آتی در زمینه‌ی الگوریتم‌های مدیریت منابع در سیستم‌های چندپهپادی ترسیم می‌کند.

الگوریتم‌های تکاملی و هم‌تکاملی

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های تکاملی و هم‌تکاملی برای مدیریت و تخصیص منابع در سیستم‌های چندپهپادی توسعه یافته‌اند. در پژوهش [23]، از الگوریتم‌های هم‌تکاملی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در پهپادها استفاده شد. این الگوریتم‌ها با الهام از فرایندهای تکامل طبیعی و همکاری میان موجودات اکوسیستم، به گونه‌ای طراحی شدند که به‌طور هم‌زمان مصرف انرژی را کاهش داده و تعاملات میان پهپادها را مدیریت کنند. نتایج نشان داد مصرف انرژی پهپادها تا 25 درصد کاهش یافته و طول عمر عملیاتی آن‌ها افزایش پیدا کرده است. همچنین، پهپادها توانستند به‌صورت خودکار تصمیمات بهینه برای مدیریت انرژی اتخاذ کنند.

در پژوهش [24] نیز از الگوریتم‌های تکامل جمعی همچون الگوریتم‌های ژنتیک و الگوریتم‌های مبتنی بر رفتار اجتماعی استفاده شد. این الگوریتم‌ها با مدل‌سازی اصول همکاری در طبیعت، امکان تخصیص بهینه منابع را میان پهپادها فراهم کردند. در این روش، پهپادها مشابه عوامل طبیعی به‌صورت هماهنگ و مستقل منابع را تخصیص داده و مأموریت‌های پیچیده را اجرا کردند. نتایج نشان داد این روش‌ها عملکرد بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک داشته و سرعت انجام مأموریت‌ها و بهره‌وری منابع را افزایش داده‌اند.

الگوریتم‌های کلونی و هوش جمعی

الگوریتم‌های کلونی مورچه‌ها و روش‌های هوش جمعی نیز توجه زیادی در این حوزه به خود جلب کرده‌اند. در پژوهش [25]، از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها برای تخصیص منابع و طراحی مسیر در مأموریت‌های جستجو و نجات استفاده شد. در این مدل، هر پهپاد مشابه یک مورچه رفتار می‌کرد و به دنبال یافتن مسیر بهینه برای مصرف منابع و اجرای مأموریت بود. نتایج نشان داد این روش توانست زمان عملیات را کاهش داده و منابع محدود پهپادها را بهینه مدیریت کند. در پژوهش [26] الگوریتم‌های هوش جمعی مانند الگوریتم ازدحام ذرات برای تخصیص منابع در سیستم‌های چندپهپادی به کار گرفته شدند. این الگوریتم‌ها با شبیه‌سازی رفتار اجتماعی موجودات، راهکارهایی برای همکاری میان پهپادها ارائه دادند. نتایج مقایسه‌ای نشان داد که الگوریتم PSO نسبت به سایر روش‌های ازدحامی عملکرد بهتری در تخصیص منابع داشته است.

همچنین، در پژوهش‌های دیگری [23-25]، ترکیب الگوریتم‌های هوش جمعی با تکنیک‌هایی همچون یادگیری عمیق و طراحی مسیرهای پروازی بررسی شد. این رویکردها توانستند با کاهش تأخیر در ارسال داده، بهره‌وری شبکه‌های پهپادی را در سناریوهای پیچیده بهبود دهند.

الگوریتم‌های اکوسیستم و مدل‌های زیستی

الگوریتم‌های الهام‌گرفته از اکوسیستم و تعاملات بین‌گونه‌ای نیز در مدیریت منابع پهپادها به‌کار رفته‌اند. در پژوهش [23] روش بهینه‌سازی اکوسیستم مصنوعی همراه با یادگیری عمیق برای مدیریت انرژی و طراحی مسیرهای پروازی استفاده شد و بهبود قابل توجهی در کارایی شبکه‌های پهپادی ایجاد کرد. پژوهش [24] به طراحی الگوریتم‌های هوش جمعی برای تخصیص منابع حسگرهای پهپادهای همکار پرداخته است که با الهام از رفتار ازدحامی، مصرف انرژی و تأخیر شبکه را بهینه‌سازی کردند. همچنین، در پژوهش [25] بهینه‌سازی ترکیبی برای تخصیص زیرکانال‌ها و مسیرهای پروازی پیشنهاد شد که منجر به بهبود عدالت در تخصیص منابع شد. مدل‌های زیستی مانند Lotka–Volterra نیز برای شبیه‌سازی رقابت میان پهپادها استفاده شده‌اند [26]. این مدل‌ها با شبیه‌سازی رقابت بر سر منابع مشترک، بهره‌وری سیستم را در شرایط پویا بهبود دادند. الگوریتم کلونی مورچه‌ها نیز در پژوهش [27] برای بهینه‌سازی مسیرها و تخصیص منابع استفاده شد و توانست زمان عملیات را کاهش دهد. در پژوهش [28] نیز از تعاملات زیستی مانند رقابت و همزیستی برای تخصیص پویا منابع در شرایط اضطراری استفاده شد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم‌های الهام‌گرفته از تعاملات زیستی – از تکامل و رفتار جمعی گرفته تا اکوسیستم‌ها – توانسته‌اند راهکارهای نوینی برای مدیریت منابع پهپادها ارائه دهند. با این حال، بیشتر این روش‌ها تمرکز محدودی بر یک جنبه خاص (مانند انرژی یا مسیر) داشته‌اند. پژوهش حاضر با معرفی الگوریتم CORES، رویکردی جامع‌تر ارائه می‌دهد که مدیریت حافظه، پردازش و کیفیت داده را به‌طور هم‌زمان بهینه می‌کند و می‌تواند جایگاه جدیدی در میان رویکردهای موجود ایجاد نماید. جدول **1** نمایی مقایسه‌ای از مهم‌ترین الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت در مدیریت منابع پهپادها ارائه می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رویکردهای تکاملی و هم‌تکاملی بیشترین تمرکز را بر کاهش مصرف انرژی داشته‌اند و توانسته‌اند طول عمر مأموریت‌ها را افزایش دهند. الگوریتم‌های کلونی و ازدحامی نیز با شبیه‌سازی رفتار جمعی موجودات، عمدتاً در بهینه‌سازی مسیر و تخصیص منابع کاربرد یافته‌اند، هرچند اغلب با مشکل گیر افتادن در بهینه‌های محلی مواجه هستند. مدل‌های اکوسیستم و زیستی مانند Lotka–Volterra نیز توانسته‌اند تعاملات رقابتی و همزیستی را بازنمایی کنند، اما اغلب تنها بر یک جنبه خاص مانند انرژی یا مسیر متمرکز بوده‌اند. در مقایسه، الگوریتم CORES با ترکیب ساختار داده‌ی چهاردرخت پویا و معیارهای ارزش‌گذاری محیطی، رویکردی جامع‌تر ارائه می‌دهد که به‌طور هم‌زمان مصرف حافظه، کیفیت داده و سربار پردازشی را بهینه می‌کند. این ویژگی، جایگاه CORES را به‌عنوان یک چارچوب نوآورانه و تعمیم‌پذیر در میان روش‌های موجود برجسته می‌سازد.

جدول 1 - مقایسه الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت برای مدیریت منابع پهپادها

منابع	رویکرد	محدودیت‌ها	مزایا	هدف اصلی
[23], [24]	الگوریتم‌های تکاملی و هم‌تکاملی	تمرکز عمدتاً روی انرژی، نه کیفیت داده	کاهش مصرف انرژی تا 25٪، تصمیم‌گیری خودکار	کاهش مصرف انرژی، افزایش طول عمر مأموریت
[24]	الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماعی	نیازمند محاسبات زیاد در مقیاس بزرگ	افزایش سرعت مأموریت، بهبود بهره‌وری	تخصیص هماهنگ منابع میان پهپادها
[25]	الگوریتم‌های کلونی مورچه‌ها	حساسیت به تنظیم پارامترها	کاهش زمان عملیات، مدیریت کارای منابع	طراحی مسیر و تخصیص منابع
[26]	الگوریتم‌های هوش ازدحامی	بهینه‌سازی محلی، احتمال گیر افتادن در مینیمم محلی	عملکرد بهتر نسبت به سایر روش‌های ازدحامی، همکاری مؤثر	تخصیص منابع در سیستم چندپهپادی
[23]	الگوریتم‌های اکوسیستم مصنوعی	پیچیدگی پیاده‌سازی، نیاز به داده‌های آموزشی	بهبود قابل توجه کارایی شبکه‌های پهپادی	مدیریت انرژی و طراحی مسیر پرواز
[26], [28]	مدل‌های زیستی Lotka–Volterra	تمرکز محدود بر یک جنبه خاص (انرژی/مسیر)	بهبود بهره‌وری در شرایط پویا، سازگاری با تغییرات	شبیه‌سازی رقابت منابع، تخصیص پویا
پژوهش فعلی	الگوریتم CORES	حساسیت به تنظیم τ و FoV ، نیاز به تنظیم دقیق پارامترها	مدیریت چندمنظوره، تعمیم‌پذیری به شبکه‌های حسگر و محیط‌های واقعی	بهینه‌سازی هم‌زمان حافظه، کیفیت داده و سربار پردازشی

روش پیشنهادی

ایده‌ی اصلی روش پیشنهادی بر شبیه‌سازی تعاملات زیستی میان گونه‌ها در فرایند تخصیص منابع است. در این رویکرد، پهپادها به‌عنوان عوامل مستقل اما هم‌زیست در یک محیط پویا در نظر گرفته می‌شوند که برای دستیابی به منابع محدود ـ شامل حافظه، توان پردازشی و داده‌های محیطی ـ وارد فرایند رقابت و همکاری می‌شوند. الگوریتم CORES (الگوریتم همزیستی برای تخصیص منابع) بر اساس همین مفهوم طراحی شده و تلاش می‌کند میان اهداف متعارض، یعنی کیفیت داده، کارایی محاسباتی و مصرف منابع، تعادل برقرار کند. برای تحقق این هدف، CORES با بهره‌گیری از ساختار داده‌ی چهاردرخت پویا، محیط مأموریت را به نواحی قابل‌مدیریت تقسیم کرده و بر مبنای معیارهایی چون ارزش محیطی، تازگی داده، هم‌پوشانی و اولویت میدان دید، تصمیم‌گیری تطبیقی را میان پهپادها هدایت می‌کند. در ادامه، جزئیات مدل‌سازی ریاضی، فرایند تصمیم‌گیری و مراحل اجرای الگوریتم تشریح می‌شود.

تعریف تعاملات بین گره‌های چهار درخت پویا

تعاملات در سیستم‌های زیستی و اکولوژیکی ذاتا پیچیده بوده و تحت تاثیر عوامل متعددی مانند رفتارهای خطی و غیرخطی، اثرات مستقیم و غیرمستقیم و همچنین مقیاس‌های مکانی و زمانی متفاوت قرار دارند. مدلسازی این تعاملات با استفاده از یک رویکرد تک‌بعدی یا روابط ساده قادر به نمایش دقیق این پیچیدگی‌ها نیست. از این رو، به‌کارگیری ترکیب چند مدل رویکردی علمی و کارآمد برای تحلیل تعاملات در چنین سیستم‌هایی محسوب می‌شود.

انعطاف‌پذیری در مدلسازی، به‌ویژه به دلیل تنوع مقیاس‌های فضایی و زمانی، اهمیت زیادی دارد. ترکیب چند مدل این امکان را فراهم می‌آورد که بسته به هدف و سطح تحلیل، عناصر مختلف سیستم به شکل بهینه بررسی شوند. این رویکرد علاوه بر پوشش تعاملات چندبعدی، قادر است نقاط قوت مدل‌های مختلف را در کنار هم قرار داده و محدودیت‌های هر یک را جبران کند. در مدلسازی تعاملات بین گره‌های چهاردرخت پویا، چند عامل اساسی نقش تعیین‌کننده دارند:

- **فاصله :**شدت تعاملات معمولاً با افزایش فاصله کاهش می‌یابد؛ مشابه الگوهای طبیعی که در بسیاری از اکوسیستم‌ها مشاهده می‌شوند.
- **تراکم :**افزایش تراکم در یک ناحیه می‌تواند شدت رقابت برای منابع محدود را افزایش دهد و شکل تعاملات را تغییر دهد.
- **غیرخطی بودن تعاملات :**بسیاری از سیستم‌ها رفتار غیرخطی دارند؛ تغییرات کوچک در ورودی‌ها می‌تواند منجر به تغییرات بزرگ و غیرقابل پیش‌بینی در خروجی‌ها شود.
- **اثرات غیرمستقیم :**در شبکه‌های پیچیده، اثرات غیرمستقیم از طریق عناصر واسطه‌ای بروز می‌کنند.این تعاملات که در مدل‌های ساده نادیده گرفته می‌شوند، نقش مهمی در پویایی کل سیستم دارند.

بر این اساس، مدل تعاملات بین گره‌های چهاردرخت پویا به‌صورت یک سیستم ترکیبی طراحی شده است. این چارچوب، با الهام از طبیعت و با تکیه بر مفاهیم تعاملات زیستی، امکان بهینه‌سازی تخصیص منابع و مدیریت تعاملات بین گره‌ها را فراهم می‌کند. ویژگی‌های کلیدی این رویکرد عبارتند از:

- مدل‌سازی هم‌زمان سیستم‌های ساده و پیچیده؛
- پوشش مقیاس‌های مختلف فضایی و زمانی در تحلیل؛
- امکان نمایش تعاملات خطی، غیرخطی، مستقیم و غیرمستقیم.

این چارچوب ترکیبی به پهپادها اجازه می‌دهد در محیط‌های پویا و ناهمگن، منابع خود را کارآمدتر مدیریت کرده و ضمن کاهش سربار پردازشی، کارایی مأموریت‌ها را به‌طور معناداری بهبود دهند.

مدلسازی تعاملات بین گره‌ها با ماتریس $Q_{i,j}$

به منظور مدلسازی تعاملات بین گره‌ها از ماتریس $Q_{i,j}$ استفاده می‌شود. $Q_{i,j}$یک ماتریس وزنی یا انتقالی است که اثرات غیرمستقیم ناشی از تعاملات بین گره i و گره j را محاسبه می‌کند. این ماتریس به سه بخش اصلی وابسته است:

- **روابط میان‌گره‌ای :** میزان ارتباط مستقیم و غیرمستقیم بین گره‌ها
- **ویژگی‌های داخلی گره‌ها :** ارزش داده‌ها یا اهمیت هر گره
- **تأثیرات محیطی :** شرایط محیطی یا زمینه‌ای که تعاملات در آن رخ می‌دهد

ماتریس $Q_{i,j}$ در روابط (1) تا (3) تعریف شده است که در آن $\omega_{i,k}$ وزن تعامل مستقیم بین گره i و گره واسط k

است. وزن‌های $\omega_{i,k}$ و $\omega_{i,k}$ نشان‌دهنده وزن بین گره i و k، که به فاصله $d_{k,j}$، تراکم گره‌ها ρ و پارامتر کاهش نمایی β بستگی دارد. در $Q_{i,j}$ گره‌های واسط k باعث ایجاد اثرات غیرمستقیم می‌شوند. برای نمونه اگر گره i و گره j مستقیماً ارتباط نداشته باشند، گره k می‌تواند به عنوان واسطه اثر خود را بگذارد. هم‌چنین وزن‌های $\omega_{i,k}$ و $\omega_{j,k}$ میزان تأثیر گره واسط را تعدیل می‌کنند[29].

$$Q_{i,j} = \begin{cases} \omega_{i,j} \cdot f_{ij}(x_i, x_j, t, \rho_i, \rho_j), if\ k = 0 \\ \sum_{k \neq i,j} \omega_{i,k} \cdot \omega_{k,j} \cdot f_k(x_k, t, \rho_k), if\ k \neq 0 \end{cases} \quad (۱)$$

$$\omega_{i,j} = \frac{e^{-d\beta_{i,j}}}{1 + d\alpha_{i,j}} \quad (۲)$$

$$f_{ij}(x_i, x_j, t, \rho_i, \rho_j) = \alpha.(x_i^2 + x_j^2) + \lambda.\sin(\omega t) - \mu.(\rho_i, \rho_j) \quad (۳)$$

در رابطه (3) $f_{ij}\left(x_i, x_j, t, \rho_i, \rho_j\right)$، تابع تعیین اهمیت که بر اساس ویژگی‌های i و j تعریف می‌شود. تابع $f_k(x_k, t, \rho_k)$ در رابطه (4) برای تعیین اهمیت گره k استفاده می‌شود. این تابع می‌تواند ارزش گره و تأثیر محیطی را در نظر بگیرد. این تابع ترکیبی از رفتار غیرخطی x_k^2، تأثیرات زمانی دوره‌ای $\sin(\omega t)$ و اثر منفی تراکم ρ_k را مدل‌سازی می‌کند.

$$f_k(x_k, t, \rho_k) = \alpha.x_k^2 + \lambda.\sin(\omega t) - \mu.\rho_k \quad (۴)$$

فرض کنید یک پهپاد در حال مدیریت منابع بین گره‌های مختلف است. گره i و j داده‌های خود را به پهپاد ارسال می‌کنند. اما گره واسط k نیز اطلاعاتی را ارائه می‌دهد که بر تصمیم‌گیری پهپاد تأثیر می‌گذارد. در این حالت اگر $d_{i,k}$ و $d_{k,j}$ کم باشد، اثر غیرمستقیم k بر تعامل i و j بیشتر خواهد بود. هم‌چنین اگر داده‌های k اهمیت بیشتری داشته باشند بر اساس $f_k(x_k)$، این اثر تقویت می‌شود. تابع $P_{i,j}(X_i, X_j)$ در رابطه (5) به مدل $Q_{i,j}$ امکان می‌دهد که پیچیدگی‌های تعاملات واقعی را با دقت بیشتری نمایش دهد.

$$P_{i,j}(X_i, X_j) = S_{i,j} \cdot R_{i,j} \cdot T_{i,j} \quad (۵)$$

در رابطه (5) تابع $S_{i,j}$ شدت تعامل، که به فاصله بین گونه‌ها و ویژگی‌های آن‌ها بستگی دارد. $R_{i,j}$ تأثیر منابع، که رقابت یا همکاری بر سر منابع را نشان می‌دهد $T_{i,j}$. عامل زمانی، که وابستگی تعاملات به زمان را مدل می‌کند. در سیستم ارائه شده، شدت تعامل براساس رابطه (6) مدل شده است. این رابطه با ترکیب تعاملات مستقیم و غیر مستقیم شدت تعاملات مختلفی را برای شرایط خاص و رویکردهای متفاوتی بین گره‌های چهار درخت پویا ارائه می‌دهند. تابع $h_{i,j}(x_i, x_j, d_{i,j})$ که در رابطه (7) نشان داده شده است، شدت تعامل مستقیم بر اساس فاصله و تراکم گونه‌ها به صورت خطی را تعریف می‌کند. پارامتر $d_{i,j}$ فاصله بین گونه i و j، پارامتر β برای تنظیم تأثیر فاصله، پارامتر ρ_i تراکم گونه i در محیط و (x_i, x_j) ویژگی‌های داخلی گره‌ها است. شدت تعاملات غیرمستقیم هم براساس ماتریس $Q_{i,j}$ که در قسمت قبل محاسبه شد به دست می‌آید. پارامتر η اهمیت تعاملات مستقیم و γ اهمیت تعاملات غیرمستقیم را تنظیم می‌کند.

$$S_{i,j} = \eta.h_{i,j}(x_i, x_j, d_{i,j}) + \gamma.Q_{i,j} \quad (۶)$$

$$h_{i,j}(x_i, x_j, d_{i,j}) = \frac{e^{(-\beta.d_{i,j})}}{1 + \rho_i.\rho_j}.(x_i.x_j - |x_i - x_j|) \quad (۷)$$

تأثیر منابع بر اساس رقابت یا همکاری میان گونه‌ها در رابطه (8) مدل می‌شود که در آن ω_i وزن منابع گونه i و نمایانگر اهمیت آن است. r_i میزان منابع در دسترس گونه i و γ پارامتر تنظیم حساسیت رقابت به اختلاف منابع است به عبارتی نشان می‌دهد که تا چه حد اختلاف در میزان منابع موجود بین دو گونه می‌تواند بر تعاملات آن‌ها تأثیر بگذارد. این پارامتر در واقع تنظیم‌کننده میزان حساسیت رفتار گونه‌ها نسبت به منابع است و کمک می‌کند مدل برای شرایط مختلف زیست‌محیطی انعطاف‌پذیر شود[30].

$$R_{i,j} = \frac{\omega_i.\omega_j}{1 + \gamma.(r_i - r_j)^2} \quad (۸)$$

تعاملات زمانی که در رابطه (9) نشان داده شده است، با تابعی سینوسی یا تناوبی برای مدل‌سازی چرخه‌های طبیعی استفاده می‌شوند که در آن t زمان جاری و T_c دوره تناوب زمانی[31].

$$T_{i,j} = sin^2(\frac{2\pi t}{T_c}) \quad (۹)$$

مدل ترکیبی از پیچیدگی‌های تعاملات واقعی به صورت رابطه (10) خواهد بود:

$$P_{i,j}'(X_i, X_j) = \frac{e^{(-\beta.d_{i,j})}.\omega_i.\omega_j.sin^2(\frac{2\pi t}{T_c})}{(1 + \rho_i.\rho_j).(1 + \gamma.(r_i - r_j)^2)} \quad (۱۰)$$

تابع $P_{i,j}'\left(X_i, X_j\right)$ به‌عنوان یک مدل ریاضی از تعاملات طبیعی می‌تواند روابط پیچیده بین گونه‌ها را شبیه‌سازی کند. این تابع با استفاده از سه مؤلفه (شدت تعامل، تأثیر منابع، و

عامل زمانی) به خوبی ویژگی‌های واقعی گونه‌ها را منعکس می‌کند. به طور خاص در الگوریتمCORES ، این تابع به تنظیم مصرف منابع و بهبود کیفیت عملکرد سیستم کمک می‌کند.

الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم‌های بهینه‌سازی الهام‌گرفته از طبیعت بر اساس رفتارهای رقابتی و همکاری موجودات زنده در اکوسیستم‌ها، الهام‌بخش طراحی مدل‌های تخصیص منابع در سیستم‌های پیچیده هستند. در این راستا، الگوریتم CORSE که برای مدیریت منابع پهپادها طراحی شده، می‌تواند با استفاده از این اصول بهینه‌تر عمل کند. این الگوریتم از ترکیب میدان پتانسیل مصنوعی و ساختار داده‌های پویا مانند چهاردرخت و DCEL بهره می‌برد. در ادامه، چگونگی تعریف منابع، رقابت، و ارزش‌گذاری در این الگوریتم و تنظیمات پیشنهادی شرح داده می‌شود. برای مدلسازی الگوریتم CORSE [1] در زمینه استفاده از ساختار داده‌ای چهاردرخت پویا، باید الگوریتمی طراحی شود که به صورت همزمان مصرف حافظه، کیفیت داده‌ها و سربار پردازشی را بهینه کند. این الگوریتم باید بتواند با توجه به اهمیت نواحی مختلف در محیط، پهپاد را به سمت تصمیمات بهینه در زمینه تقسیم‌بندی داده‌ها و مدیریت میدان دید هدایت کند.

روش‌های سنتی چهاردرخت معمولاً تقسیم‌بندی یکنواختی را ارائه می‌دهند که منجر به هدررفت حافظه در مناطقی با اهمیت کمتر می‌شود. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های پویا می‌تواند انعطاف‌پذیری و کارایی این ساختارها را بهبود بخشد. در این پژوهش از الگوریتم میدان پتانسیل مصنوعی برای ارزش‌گذاری نقاط محیطی به منظور هدایت مسیر پهپاد استفاده شده است. همچنین، برای مدیریت و سازمان‌دهی داده‌های محیطی پهپادها از ساختارهای داده چهاردرخت پویا و ساختار داده DCEL به‌دلیل توانایی بالا در مدیریت روابط توپولوژیکی برای نمایش هندسی داده‌ها استفاده شده است. الگوریتم CORSE با ترکیب این روش‌ها و معرفی مفاهیم جدیدی مانند تنظیم پویا ارتفاع پهپاد و بهینه‌سازی مصرف منابع، یک رویکرد جدید ارائه می‌دهد. مدل ریاضی از پارامترهای زیر برای تعریف تعاملات و مصرف منابع در چهاردرخت پویا استفاده می کند.

1. **مصرف حافظه :**منابع حافظه‌ای که برای ذخیره و مدیریت داده‌های محیطی استفاده می‌شود.
2. **سربار پردازشی :**زمان و توان پردازشی لازم برای تحلیل و به‌روزرسانی داده‌ها.
3. **منابع محیطی :**کیفیت و اهمیت داده‌های جمع‌آوری‌شده از نقاط مختلف محیطی.
4. **ارتفاع پهپاد :**که به طور غیرمستقیم بر مصرف انرژی و دقت داده‌ها تأثیر می‌گذارد.

الگوریتم CORES می‌تواند رقابت منابع را مشابه رفتار موجودات زنده در طبیعت به این صورت مدل‌سازی کند که گره‌های موجود در ساختار چهاردرخت برای تخصیص حافظه و توان پردازشی رقابت می‌کنند و مناطقی که داده‌های با اهمیت‌تر دارند، اولویت بیشتری در این رقابت خواهند داشت. هم‌چنین به مناطقی با تراکم بالا و داده‌های حساس، منابع بیشتری جهت تحلیل و ذخیره اطلاعات تخصیص می‌یابد. ارزش‌گذاری نقاط محیطی بر اساس الگوریتم میدان پتانسیل مصنوعی انجام می‌شود. منابع تعریف‌شده در این فرآیند به این شکل بهینه‌سازی می‌شوند که نقاط حساس‌تر (با ارزش محیطی بالاتر) بخش بیشتری از حافظه را اشغال می‌کنند، در حالی که نقاط کم‌اهمیت‌تر با دقت پایین‌تر ذخیره می‌شوند. هم‌چنین پردازش داده‌های نقاط با ارزش محیطی بالاتر، اولویت‌بندی شده و پهپاد می‌تواند ارتفاع خود را در نقاط کم‌اهمیت افزایش دهد تا سربار پردازشی کاهش یابد.

ساختار داده چهاردرخت پویا نیز برای هماهنگی با رفتارهای طبیعت به این صورت تنظیم می‌شود که این ساختار داده باید به‌طور دینامیک و بر اساس تراکم داده‌های محیطی به‌روزرسانی شود. مناطق با تراکم داده بیشتر، تقسیم‌بندی دقیق‌تری دریافت می‌کنند. ساختار داده DCEL در روابط توپولوژیکی داده‌ها باید به گونه‌ای سازمان‌دهی شود که پردازش داده‌های حساس ساده‌تر و سریع‌تر انجام شود.

این رویکرد ترکیبی از رقابت و همکاری را در سیستم الگوریتمی CORSE وارد می‌کند و امکان استفاده بهینه از منابع در محیط‌های پیچیده و رقابتی را فراهم می‌سازد. با این تنظیمات، الگوریتم قادر خواهد بود نه تنها منابع را بهینه‌تر تخصیص دهد، بلکه با در نظر گرفتن تعاملات پیچیده بین داده‌ها، به یک مدل هوشمند و کارآمد برای مدیریت مأموریت‌های پهپاد دست یابد. ابتدا باید مدل کلی تخصیص

[1] Collective Optimization for Resource Efficiency and Sustainability

منابع را تعریف کنیم. فرض کنید چندین گونه (یا عامل) وجود دارند که می‌خواهند منابع محدودی را که در دسترس است به‌طور بهینه تخصیص دهند. ورودی‌ها شامل m گونه مختلف که هرکدام منابع خاصی مصرف می‌کنند، n نوع منابع محدود (مثلاً حافظه، توان پردازشی، منابع محیطی و ارتفاع پهپاد).

جدول 2 - معرفی پارامترهای به کار رفته در روش پیشنهادی

نماد	توضیح
R_j	مقدار کل منابع موجود.
NN	تعداد گونه‌ها یا عوامل
β	نرخ رقابت بین گونه‌ها.
γ	نرخ همکاری بین گونه‌ها.
η	نرخ همکاری تقویت‌شده برای تعاملات خاص.
λ	ضریب وزن‌دهی به اهداف مختلف در مدل که میزان اهمیت تعاملات را کنترل می‌کند.
X_i	مقدار منابع تخصیص یافته به گونه i
R_j	مجموعه گره‌های چهاردرخت پویا که هر گره نشان‌دهنده یک بخش از فضا است.
$V(r_i)$	ارزش اطلاعاتی گره r که توسط الگوریتم میدان پتانسیل مصنوعی محاسبه می‌شود.
$C_i(X_i)$	هزینه یا بهره‌وری تخصیص منابع به گونه i
M	محدودیت حافظه پهپاد.
$Q(r_i)$	کیفیت داده‌های ذخیره‌شده برای گره r_i.
$P_{i,j}(X_i,X_j)$	تعاملات رقابتی یا همکاری میان گونه‌ها i و j که به تخصیص منابع بستگی دارد.
$h_{i,j}(x_i,x_j)$	تابعی که میزان همکاری مؤثر بین گونه i و j که را مدل می‌کندکه تأکید بر همکاری متقارن و نزدیکی در تخصیص منابع دارد.

فرض کنید که می‌خواهیم مجموعه‌ای از اهداف را به‌طور همزمان بهینه کنیم. این اهداف می‌توانند شامل حداکثر کردن بهره‌وری، حداکثر کردن تنوع زیستی یا کاهش مصرف منابع باشند. الگوریتم پیشنهادی باید سه تابع هدف شامل مصرف حافظه (رابطه (11))، کیفیت داده‌ها (رابطه (12)) و سربار پردازشی(رابطه (13) را متعادل کند و تابع هدف اصلی را به دست می‌آورد که در آن α، β و γ پارامترهای وزن‌دهی تنظیم‌شده بر اساس اولویت سیستم هستند(جدول **2**). مصرف حافظه عمدتا به تعداد و اندازه داده‌های ذخیره‌شده در نقاط مختلف محیط بستگی دارد و نیازمند بهبود بهره‌وری تخصیص منابع[1] است. این روند به تعاملات میان گره‌ها یا منابع وابسته نیست، زیرا تخصیص حافظه مستقیما از اولویت‌بندی بر اساس ارزش داده‌ها و تراکم محیطی ناشی می‌شود و به تعاملات میان گره‌ها وابسته نیست.

$$\text{Minimize } z_1 = \sum_{r\in R} \text{Memory(r)} \quad (11)$$

گونه‌ها به‌طور مستقیم منابع را مصرف می‌کنند، اما میزان مصرف منابع توسط هر گونه ممکن است بر اساس دیگر گونه‌ها تغییر کند. برای مثال، بهره‌وری گونه‌ها به دلیل رقابت برای منابع ممکن است کاهش یابد. فرض کنید بهره‌وری یک گونه به تعداد گونه‌های دیگر که منابع مشابهی را مصرف می‌کنند بستگی داشته باشد. می‌توان این را به صورت یک مدل رقابتی در نظر گرفت که به‌طور غیرمستقیم بر تخصیص منابع تأثیر می‌گذارد. در مدل اولیه، یکی از اهداف z_2 بهبود کیفیت داده‌ها است. کیفیت اطلاعات بستگی به دو عامل دارد:

1. کیفیت داده :Q(r) که به ویژگی‌های داده (مثلاً دقت و جامعیت) مرتبط است.
2. اهمیت داده :V(r)که بر اساس ارزش محیطی و تأثیر بر تصمیم‌گیری کلی تعیین می‌شود.

لذا در محیط‌هایی که تعاملات میان گره‌ها وجود دارد، کیفیت کلی اطلاعات ممکن است از طریق اشتراک‌گذاری داده‌ها، همکاری، یا رقابت گره‌ها تحت تأثیر قرار گیرد. گره‌های نزدیک به یکدیگر ممکن است داده‌های تکراری یا مکمل داشته باشند. گره‌هایی که برای دسترسی به یک منطقه رقابت می‌کنند، می‌توانند باعث کاهش یا افزایش کیفیت اطلاعات شوند. بنابراین $P_{i,j}(X_i,X_j)$ تعامل میان گونه‌ها است که می‌تواند رقابتی یا همکاری باشد. λ_1 پارامتر وزن‌دهی برای تنظیم میزان تاثیر تعاملات میان گونه‌ها است.

$$\text{Maximize } z_2 = \sum_{r\in R} V(r_i).Q(r_i) + \lambda_1 \sum_{i=1}^{n}\sum_{j\neq i} P_{i,j}(X_i,X_j) \quad (12)$$

هزینه پردازشی به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود:

1. **هزینه پردازش فردی** :C(r)که به ویژگی‌های داخلی هر گره بستگی دارد.
2. **هزینه ناشی از تعاملات :** $P_{i,j}(X_i,X_j)$که از رقابت یا همکاری گره‌ها برای دسترسی به منابع یا انجام پردازش مشترک ناشی می‌شود.

[1] Efficiency of resource utilization

الگوریتم CORES از میدان پتانسیل مصنوعی استفاده می‌کند که تعاملات را به عنوان بخشی از هزینه پردازشی به این صورت مدل می‌کند که در مناطقی با تراکم داده بالا، رقابت بین گره‌ها برای پردازش داده‌ها می‌تواند سربار پردازشی را افزایش دهد و در مناطقی با همکاری بیشتر، سربار پردازشی ممکن است کاهش یابد. پس اگر سربار پردازشی نیز تحت تأثیر تعاملات رقابتی و همکاری میان عوامل $P_{i,j}(X_i, X_j)$ باشد، پس می‌تواند به عنوان بخشی از هزینه تعاملات رقابتی[1] باشد که در $P_{i,j}(X_i, X_j)$ مدل می‌شود.

$$\text{Minimize } z_3 = \sum_{r \in R} C(r) + \lambda_2 \sum_{i=1}^{n} \sum_{j \neq i} P_{i,j}(X_i, X_j) \quad (۱۳)$$

$$Optimize\ Z = \alpha_1 z_1 - \beta_2 z_2 + \gamma_3 z_3 \quad (14)$$

از آنجاییکه ممکن است محدودیت‌هایی مانند حداکثر میزان منابع تخصیص یافته به هر گونه وجود داشته باشد، محدودیت‌ها براساس رابطه (15) زیر مدل می‌شوند:

$$R_j = \sum_{i=1}^{n} X_i, \quad X_i \leq X_{i,max}, \quad \forall i \quad (15)$$

در برخی موارد، تعاملات میان گونه‌ها باید محدود شوند، برای مثال، برای جلوگیری از رقابت شدید یا افزایش همکاری که براساس رابطه (16) مدل می‌شود.

$$P_{i,j}(X_i, X_j) \leq \beta \quad , \forall i, j \quad (16)$$

هم‌چنین ممکن است نیاز به محدودیت‌های اضافی بر روی تخصیص منابع باشد مقدار منابع تخصیص یافته به هر گونه باید مثبت باشد. که در رابطه (17) تعریف شده است.

$$X_i \geq 0 \quad , \quad \forall i \quad (17)$$

یادگیری خودتنظیمی

یک ویژگی که می‌تواند الگوریتم تخصیص منابع را بهبود بخشد، افزودن یادگیری خودتنظیمی است. این به معنی توانایی الگوریتم برای یادگیری از تجربیات گذشته و تنظیم خود برای بهبود تخصیص منابع در شرایط جدید است. در این حالت دو روش وجود دارد:

1) استفاده از یادگیری تقویتی برای بهینه‌سازی تخصیص منابع: در این روش، هر گونه به‌عنوان یک عامل یادگیرنده در نظر گرفته می‌شود که از بازخوردهای محیطی برای تنظیم رفتار خود در تخصیص منابع استفاده می‌کند. این کار باعث می‌شود که هر گونه به‌طور پیوسته بهینه‌سازی شود و از رقابت‌های بی‌نتیجه جلوگیری شود

2) یادگیری از تجربیات گذشته[2]: در این روش، گونه‌ها می‌توانند تجربیات گذشته خود را ذخیره کرده و در شرایط مشابه از آن‌ها برای تصمیم‌گیری بهتر استفاده کنند. این نوع یادگیری می‌تواند کمک کند تا الگوریتم تخصیص منابع به‌طور مستمر عملکرد خود را بهبود بخشد.

در این مرحله یک عامل یادگیرنده برای هر گونه تعریف می‌شود که تخصیص منابع را بر اساس بازخوردهای محیطی و تجربیات گذشته بهینه کند. مقدار بازخورد یا پاداش[3] برای هر گونه i می‌تواند به‌صورت تابعی از تغییرات بهره‌وری یا هزینه باشد که این بازخورد به عامل کمک می‌کند تا تخصیص‌های آینده را بهبود بخشد. برای محاسبه $F_i(X_i)$، معمولاً از یک تابع بهره‌وری استفاده می‌شود که وابسته به منابع تخصیص‌یافته به گونه i است. این تابع به طور کلی می‌تواند به صورت رابطه (18) تعریف شود:

$$F_i(X_i) = \alpha_i X_i - \beta_i X_i^2 \quad (18)$$

که در آن X_i مقدار منابع تخصیص‌یافته به گونه i است. α_i و β_i پارامترهایی هستند که نحوه تاثیر منابع بر بهره‌وری را تنظیم می‌کنند. تابع ممکن است به صورت افزایشی یا کاهشی نسبت به X_i تغییر کند، بسته به ویژگی‌های خاص مدل و سیستم مورد نظر. رابطه (19) نشان‌دهنده افزایش بهره‌وری به صورت خطی یا غیرخطی است.

$$R_i(X_i) = F_i(X_i) - \sum_{j \neq i} P_{i,j}(X_i, X_j) \quad (19)$$

هوش جمعی

با الهام از رفتارهایی که در طبیعت مشاهده می‌کنیم، می‌توان الگوریتم تخصیص منابع را به گونه‌ای طراحی کرد که از هوش جمعی بهره ببرد. این ویژگی می‌تواند الگوریتم را بسیار قوی‌تر و کارآمدتر کند. برای استفاده از استراتژی‌های هوشمندانه جمعی می‌توان از ایده‌های هم‌افزایی در طبیعت استفاده کرد. به‌عنوان مثال، گونه‌ها می‌توانند به‌طور جمعی در تصمیم‌گیری‌های مربوط به تخصیص منابع مشارکت کنند. در این سیستم، هر گونه به‌عنوان یک عامل مستقل عمل می‌کند که با دیگر گونه‌ها تعامل دارد. این تعاملات می‌توانند به‌طور

[1] Cost of processing and competition

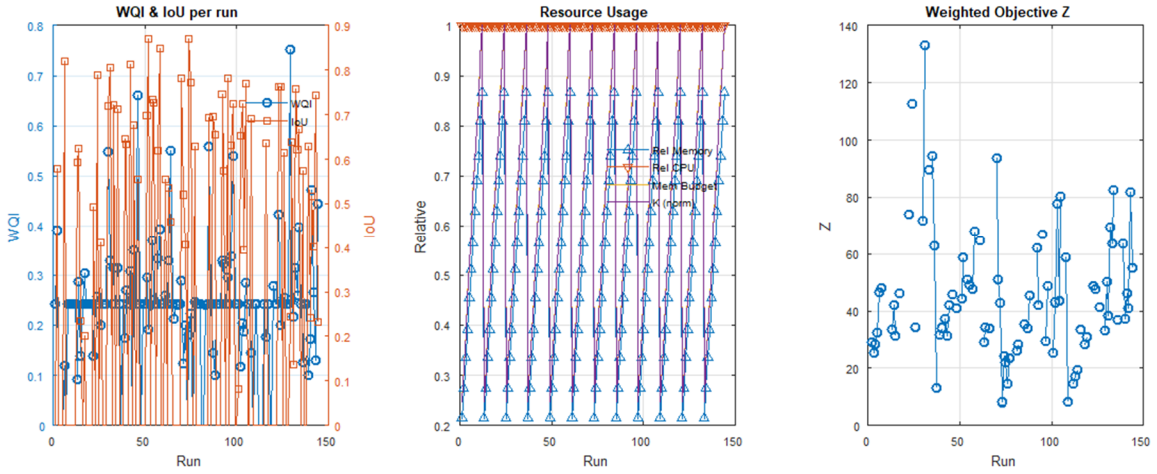
[2] Experience Replay
[3] Reward

مداوم به بهینه‌سازی تخصیص منابع کمک کنند. برای مدل‌سازی هوش جمعی، از استراتژی‌های معاملات گروهی استفاده می‌شود. این می‌تواند شامل انتقال اطلاعات بین گونه‌ها باشد تا تخصیص منابع به‌طور بهینه انجام شود. این اطلاعات ممکن است در قالب یک تابع تبادل اطلاعات (مثل تبادل پیام یا فرومون) میان گونه‌ها ارسال شود. این روش می‌تواند برای جلوگیری از تخصیص منابع به‌صورت غیر بهینه و غیرضروری، با استفاده از مکانیسم‌های اشتراک‌گذاری اطلاعات در میان گونه‌ها انجام شود. تعاملات میان گونه‌ها می‌تواند به‌صورت زیر مدل شود: که در آن α یک ضریب است که نشان‌دهنده میزان اثرگذاری رقابت یا همکاری میان گونه‌ها است.

$$P_{i,j}(X_i, X_j) = |X_i - X_j|.\alpha \quad (۲۰)$$

نتایج و آزمایشات

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، کلیه شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های عددی در محیط MATLAB R2018b انجام شده است. سناریوهای محیطی شامل نواحی مختلف زمینی، آبی و پوشش گیاهی به‌صورت مصنوعی طراحی شده‌اند تا امکان بررسی جامع رفتار الگوریتم در شرایط متنوع فراهم شود. داده‌های حاصل از اجرای مدل، مبنای ترسیم جداول و نمودارهای ارائه‌شده در این بخش قرار گرفته‌اند. ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی CORES در قالب 150 اجرای مستقل و تحت ترکیب‌های مختلف پارامترهای میدان دید (FoV)، آستانه τ و بودجه حافظه انجام شد. سه شاخص کلیدی شامل کیفیت داده (WQI) ، انطباق با داده مرجع (IoU) و هزینه چندمعیاره (Z) استخراج و تحلیل شدند. نتایج این آزمایش‌ها در شکل **1** نمایش داده شده‌اند.



شکل 1 - نتایج 150 اجرای مستقل الگوریتم CORES تحت ترکیب پارامترهای مختلف.

شاخص‌های کیفیت داده و انطباق (IoU و WQI): نمودار سمت چپ تغییرات WQI و IoU را در طول اجراها نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، WQIعمدتاً در بازه‌ی 0,0 تا 0,7 نوسان داشته و بیانگر تولید داده‌هایی با کیفیت متوسط تا خوب است. شاخص IoU نیز از 0 تا 0,8 تغییر می‌کند که نشان‌دهنده‌ی وابستگی شدید دقت به مقادیر τ و FoVاست. افت هم‌زمان هر دو شاخص در برخی بازه‌ها (مانند اجراهای 40–60 و 90–110) نشان می‌دهد که پارامترهای انتخابی در این محدوده منجر به تخصیص منابع غیربهینه شده‌اند. این نتایج با مدل رقابتی–همکاری الگوریتم سازگار است؛ زیرا تعاملات P(i, j) و ماتریس Q(i, j) در شرایطی خاص می‌توانند به کاهش کیفیت و انطباق منجر شوند.

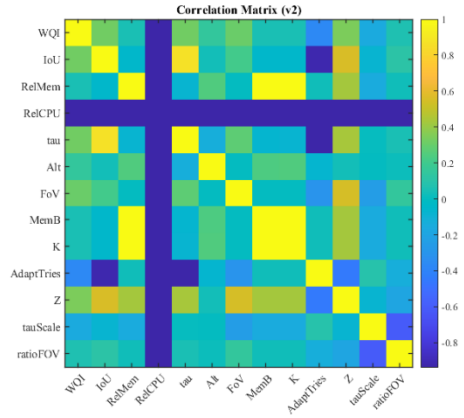
مصرف منابع (حافظه وCPU) : نمودار میانی نشان می‌دهد که مصرف حافظه نسبی (Rel Memory) تقریباً همواره زیر سقف بودجه‌ی تعریف‌شده باقی مانده است؛ به عبارت دیگر، الگوریتم توانسته محدودیت حافظه را مطابق

رابطه (11) رعایت کند. مصرف CPU تقریباً در تمامی اجراها در سطح بالایی قرار داشته که بیانگر اشباع‌بودن پردازشگر است. این رفتار با ساختار چهاردرخت پویا و به‌روزرسانی مداوم DCELقابل توضیح است؛ چراکه در محیط‌های پرتراکم سربار پردازشی افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات دندانه‌دار منحنی K (تعداد برگ‌های نرمال‌شده) ارتباط مستقیم با تغییرات بودجه حافظه و FoV دارد که در مدل رقابتی منابع پیش‌بینی شده بود.

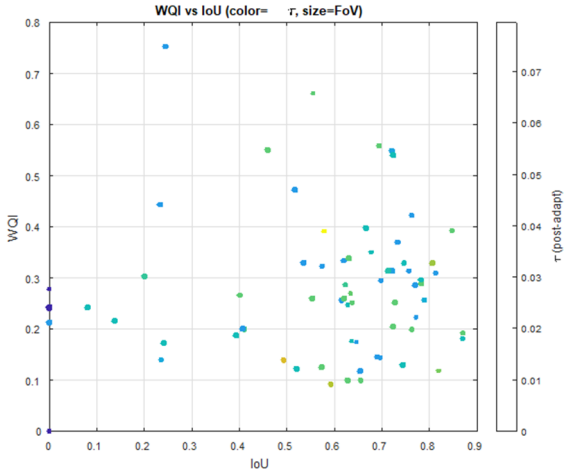
تابع هدف وزنی(Z) : نمودار سمت راست تغییرات تابع هدف وزنی (رابطه 14) را نشان می‌دهد. مقادیر Z در بازه‌ی 10 تا 135 تغییر می‌کنند. از آنجا که Z ترکیبی از مصرف حافظه، کیفیت داده، و سربار پردازشی است، مقادیر پایین‌تر معرف راه‌حل‌های بهینه‌تر هستند. در اغلب اجراها مقدار Z در محدوده‌ی 20 تا 60 قرار گرفته که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب الگوریتم است؛ با این حال، برخی اجراها دارای مقادیر بسیار بالا هستند که نشان‌دهنده‌ی حساسیت بالای مدل به ترکیب پارامترها می‌باشد. این نتایج تأیید می‌کنند که ساختار پیشنهادی در بیشتر موارد توانسته منابع را به‌صورت بهینه تخصیص دهد، اما برای دستیابی به عملکرد پایدارتر نیازمند تنظیم دقیق پارامترها است. شکل‌های **2** و **3** ماتریس همبستگی بین شاخص‌های اصلی آزمایش الگوریتم CORES را نمایش می‌دهد. شدت رنگ‌ها بیانگر میزان همبستگی منفی تا مثبت است.

مصرف منابع (حافظه وCPU) : مصرف نسبی حافظه همبستگی مستقیم با بودجه حافظه دارد؛ به‌طور مشابه، تعداد برگ‌های کوادری نیز با افزایش بودجه رشد می‌کند. این دو عامل هر دو به افزایش Z منجر می‌شوند. در مقابل، مصرف CPU تقریباً همبستگی معناداری با سایر شاخص‌ها ندارد، زیرا پردازنده در اکثر سناریوها در حالت اشباع قرار داشته است.

پارامترهای الگوریتمی: τ و τ_{Scale} همبستگی مثبت طبیعی دارند، زیرا τ_{Scale} به‌عنوان مقیاس‌دهنده τ عمل می‌کند. FoVو نسبت میدان دید همبستگی بالایی دارند و اثر مثبت بر IoU دارند، اما در عین حال افزایش آن‌ها موجب رشد هزینه Z نیز می‌شود. تعداد تلاش‌های سازگاری ارتباط مثبت با Zدارد که نشان‌دهنده افزایش سربار محاسباتی بدون تأثیر چشمگیر بر کیفیت است.



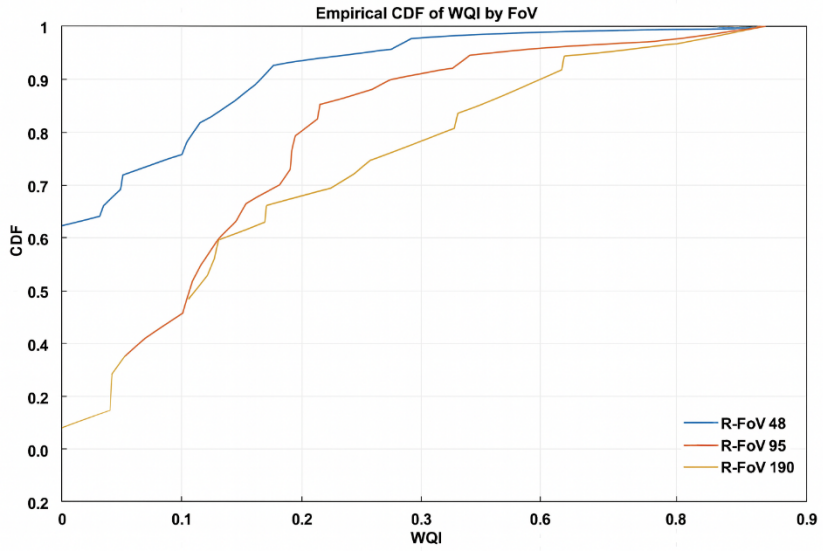
شکل 2 - ماتریس همبستگی الگوریتمCORES



شکل 3 - ماتریس همبستگی شاخص‌های اصلی الگوریتمCORES

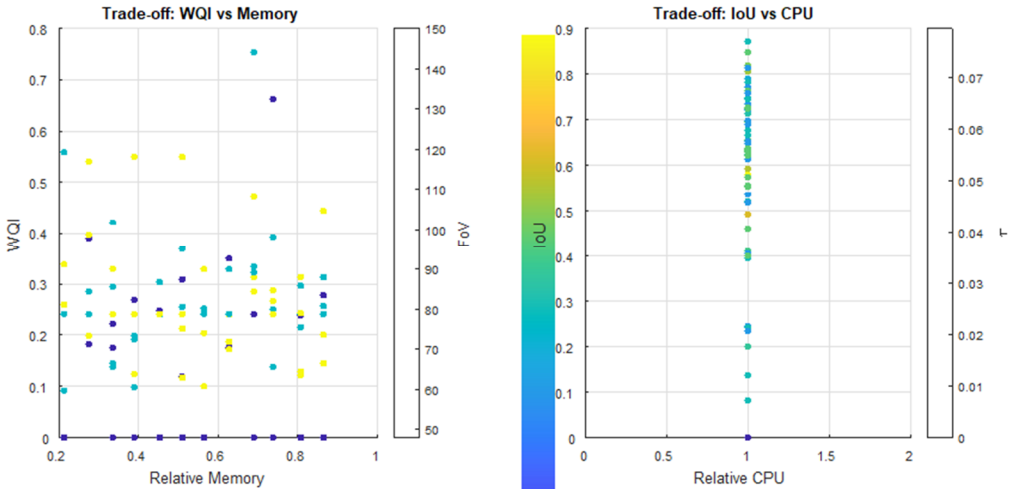
در حالی که محور عمودی WQI را نمایش می‌دهد که شاخص کیفیت وزنی داده‌ها محسوب می‌شود. رنگ نقاط متناسب با مقدار پارامتر τ است، به‌گونه‌ای که از آبی برای مقادیر کوچک تا زرد برای مقادیر بزرگ‌تر تغییر می‌کند، و اندازه نقاط نمایانگر میدان دید است؛ نقاط بزرگ‌تر به FoV وسیع‌تر مربوط می‌شوند. در بررسی الگوهای مشاهده‌شده، اکثر نتایج در محدوده IoU حدود 0,6 تا 0,8 متمرکز شده‌اند که نشان‌دهنده دستیابی پایدار الگوریتم به هم‌پوشانی قابل قبول است. مقادیر WQI توزیع گسترده‌تری دارند و در محدوده صفر تا 0,75 قرار دارند، اما تمرکز اصلی در بازه 0,2 تا 0,4 مشاهده می‌شود. برخی نمونه‌ها دارای IoU پایین اما WQI نسبتا بالا هستند که بیانگر استقلال نسبی این دو شاخص و نقش‌آفرینی سایر پارامترها مانند τ و FoV است. تغییرات τ عمدتاً در محدوده کوچک و متوسط مشاهده می‌شود و اثر غیرخطی آن بر WQI و IoU مشهود است. در جمع‌بندی می‌توان گفت

همبستگی مستقیم قوی بین WQI و IoU مشاهده نمی‌شود؛ در برخی شرایط کیفیت بدون هم‌پوشانی مطلوب افزایش یافته و بالعکس. همچنین، FoV و τ نقش کلیدی در تعیین کیفیت خروجی دارند، در حالی که IoU به‌تنهایی قادر به تبیین تغییرات WQI نیست. تمرکز نقاط در ناحیه IoU بالا (0,6–0,8) نشان می‌دهد که الگوریتم در اکثر سناریوها قادر به دستیابی به هم‌پوشانی مناسب است، اما کیفیت وزنی همچنان تابع تنظیم دقیق پارامترها باقی می‌ماند.



شکل 4 - توزیع تجمعی WQI بر حسب FoV مختلف.

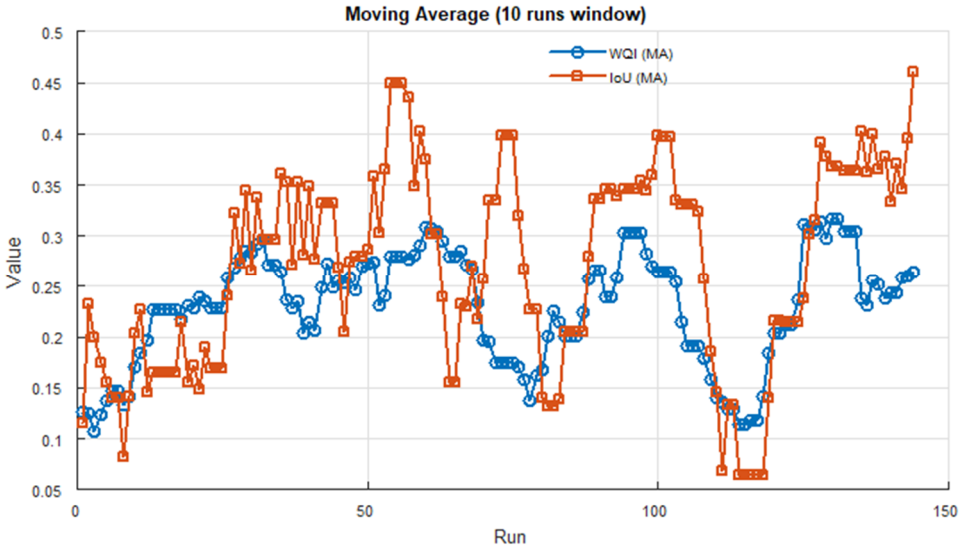
شکل **4** توزیع تجمعی تجربی شاخص کیفیت داده را برای سه مقدار متفاوت از میدان دید نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برای FoV کوچک‌تر (48 درجه) منحنی CDF به‌سرعت به مقادیر بالاتر نزدیک می‌شود و بخش عمده‌ای از داده‌ها در بازه WQI پایین (کمتر از 0,2) متمرکز هستند. این رفتار نشان می‌دهد که میدان دید محدود منجر به تولید داده‌هایی با کیفیت پایین‌تر می‌شود، هرچند که توزیع آن پایدارتر و کمتر پراکنده است. در مقابل، با افزایش FoVبه مقادیر 96 و 150 درجه، منحنی‌های CDF به سمت راست انتقال پیدا می‌کنند که بیانگر دستیابی به کیفیت داده بالاتر در بخشی از نمونه‌هاست، اما هم‌زمان پراکندگی بیشتری در نتایج به وجود می‌آید.



شکل 5 - تحلیل هم‌زمان شاخص‌های کارایی الگوریتم CORES تحت پارامترهای مختلف.

شکل **5** ارتباط میان شاخص‌های کلیدی و منابع مصرفی الگوریتم را نمایش می‌دهد. نمودار سمت چپ، تغییرات WQI بر حسب حافظه نسبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر WQI عمدتاً در بازه 0،1 تا 0،6 توزیع شده‌اند و پراکندگی داده‌ها بیانگر آن است که افزایش حافظه به‌تنهایی تضمین‌کننده بهبود کیفیت نیست. رنگ نقاط بیانگر مقدار FoVاست و نشان می‌دهد که میدان دید بزرگ‌تر اغلب منجر به افزایش نسبی WQI شده است، هرچند در برخی موارد با کاهش پایداری همراه بوده است. به‌طور کلی، رابطه WQI و حافظه غیرخطی است و تحت تأثیر متقابل τ و FoV قرار دارد.

نمودار سمت راست، ارتباط بین IoUو مصرف CPU را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، مصرف CPU تقریباً در همه‌ی اجراها نزدیک به حد اشباع باقی مانده است و تغییرات IoUبیشتر تابع τ و FoV بوده تا بار پردازشی. به بیان دیگر، افزایش یا کاهش دقت (IoU) الزاماً با تغییر چشمگیری در مصرف CPU همراه نبوده است. رنگ نقاط بیانگر تغییرات τ است و نشان می‌دهد که مقادیر بالاتر τ در برخی موارد با افت IoUهمراه بوده‌اند.



شکل 6 - تغییرات میانگین متحرک (MA) شاخص‌های WQI و IoU در طول 150اجرای الگوریتم CORES پنجره 10اجرا

شکل **6** روند تغییرات شاخص‌های کیفیت داده (WQI) و انطباق با داده مرجع (IoU) را در قالب میانگین متحرک نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هر دو شاخص در طول اجراها نوسانات قابل توجهی داشته‌اند، به‌ویژه در بازه‌های 40–60 و 90–110 که افت هم‌زمان WQI و IoU رخ داده است. این موضوع بیانگر آن است که انتخاب پارامترهای τ و FoV در این محدوده‌ها منجر به کاهش کیفیت و هم‌پوشانی شده و الگوریتم در حالت تخصیص منابع غیربهینه عمل کرده است. مقادیر IoU عموماً در بازه 0،2 تا 0،45 نوسان داشته و در بسیاری از نقاط بالاتر از WQI قرار گرفته است؛ این امر نشان می‌دهد که الگوریتم توانسته هم‌پوشانی قابل قبولی با داده مرجع ایجاد کند، هرچند کیفیت وزنی داده‌ها (WQI) در سطح پایین‌تر باقی مانده است. روند کلی نشان می‌دهد که افزایش موقتی IoU معمولاً با افزایش WQI نیز همراه است، که تأییدکننده ارتباط مثبت میان این دو شاخص است؛ با این حال، در برخی بازه‌ها (مانند اجراهای 100 تا 120) مشاهده می‌شود که کاهش شدید IoU به‌طور کامل با افت WQI همزمان نشده است.

این نتایج نشان می‌دهند که عملکرد الگوریتم CORES نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی حساس است و پایداری کیفیت خروجی تنها در بخشی از محدوده‌ی اجراها قابل دستیابی است. در مجموع، روند میانگین متحرک نشان می‌دهد که اگرچه الگوریتم در اغلب اجراها توانسته هم‌پوشانی مناسبی فراهم کند، اما کیفیت وزنی داده‌ها همچنان نیازمند تنظیم دقیق‌تر پارامترها برای دستیابی به پایداری و کارایی بالاتر است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر الگوریتم CORES را به‌عنوان یک چارچوب نوآورانه برای بهینه‌سازی منابع در سامانه‌های پویا و چندعاملی معرفی کرد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که این الگوریتم توانایی متوازن‌سازی میان مصرف حافظه، سربار پردازشی و کیفیت داده را دارد و می‌تواند در اغلب سناریوها تخصیص منابع بهینه را تضمین کند. مهم‌ترین یافته آن است که پارامترهای FoV و τ نقشی تعیین‌کننده در کیفیت خروجی ایفا می‌کنند و انتخاب مقادیر نامناسب از آن‌ها می‌تواند منجر به افت هم‌زمان کیفیت و انطباق شود. همچنین مشخص شد که افزایش کیفیت داده و دقت مکانی به‌طور ناگزیر با افزایش هزینه کل همراه است، که ضرورت تعریف یک سطح بهینه از سازش میان اهداف چندگانه را برجسته می‌سازد. از منظر کاربردی، CORES می‌تواند در حوزه‌هایی نظیر شبکه‌های حسگر بی‌سیم، ناوگان پهپادهای هوشمند، پایش زیست‌محیطی و مدیریت بحران به‌کار گرفته شود. علاوه بر این، ساختار تعمیم‌پذیر الگوریتم زمینه را برای توسعه در سایر حوزه‌های منابع محدود فراهم می‌آورد. مسیرهای آتی پژوهش می‌تواند شامل ترکیب CORES با یادگیری تقویتی برای تنظیم پویا پارامترها، بهبود مقیاس‌پذیری در شبکه‌های بزرگ‌مقیاس، و ارزیابی تجربی در محیط‌های واقعی باشد.

منابع و مراجع

[1] Chegini, E., Mazloum, J., & Khanzade Samarin, A. (2021). Design and construction of a geographical location storing and monitoring system for use in UAVs. *Journal of Information and Communication Technology in Policing*, 2(5), 1–9. doi: 10.22034/pitc.2021.95765

[2] Rezaei, G., & Dorostkar Yaghouti, B. (2024). Artificial intelligence in crime prevention; Advantages and challenges. *Journal of Information and Communication Technology in Policing*, 5(19), 10–31. doi: 10.22034/pitc.2024.1279899.1303

[3] Dorostkar Yaghouti, B. (2023). Content-based video retrieval using deep neural network for scientific crime detection in smart policing. *Journal of Information and Communication Technology in Policing*, 4(13), 10–18. doi: 10.22034/pitc.2023.1272677.1192

[4] Somashekar, K. S., Moinuddin, Belagalla, N., Srinatha, T. N., Abhishek, G. J., Kumar, V., & Tiwari, A. (2024). Revolutionizing Agriculture: Innovative Techniques, Applications, and Future Prospects in Precision Farming. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(8), 405–419. doi: 10.9734/jsrr/2024/v30i82263

[5] P.P., F. R., Ismail, W. N., & Ali, M. A. S. (2023). A Metaheuristic Harris Hawks Optimization Algorithm for Weed Detection Using Drone Images. *Applied Sciences*, 13(12), 7083. doi: 10.3390/app13127083

[6] Y., H., & Karakose, M. (2021). Collaborative truck-drone routing optimization using quantum-inspired genetic algorithms. In *Proc. Int. Conf. Information Technology (IT)* (pp. 1–6).

[7] Li, B. J., Wu, G. H., He, Y. M., Fan, M. F., & Pedrycz, W. (2022). An overview and experimental study of learning-based optimization algorithms for the vehicle routing problem. *IEEE/CAA J. Autom. Sinica*, 9(7), 1115–1138. doi: 10.1109/JAS.2022.105677

[8] Kim, T. (2004). Artificial intelligence and simulation: 13th International Conference on AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems. In *AIS 2004*.

[9] Li, G. W. Y. H. M. F., & W. P. B. (2021). An overview and experimental study of learning-based optimization algorithms for the vehicle routing problem. *IEEE/CAA J. Autom. Sinica*, 9(2), 345–359.

[10] Iranfar, A. P. M. Z. M. A. M. K., & D. A. A. A. (2024). Real-time intelligent methods for energy-efficient approaches in CNN and biomedical applications.

[11] Xu, I. P., & T., A. (2021). Modeling and performance analysis of opportunistic link selection for UAV communication. In *Proc. Italian Nat. Conf. Sensors* (pp. 1–8).

[12] Zhou, X. L. D. L., & B., J. (2024). Learning-based optimization algorithms for routing problems: Bibliometric analysis and literature review.

[13] Sorbelli, F. C. C. P., & S., A. (2023). Exploring mixed-grid environments for drone-based last-mile logistics optimization. In *Proc. IEEE Int. Conf. Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)* (pp. 1–8).

[14] Mazaheri, H., Goli, S., & Nourollah, A. (2025). Path planning of colleague UAVs based on combined GWO-NSGA-II and WOA algorithm. *Journal of Information and Communication Technology in Policing*, 6(21). doi: 10.22034/pitc.2025.1283146.1352

[15] Luo, Q., W., G., T., A. F., H., L. W., & S., D. (2023). Multi-objective optimization algorithm with adaptive resource allocation for truck-drone collaborative delivery and pick-up services. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst*, 24(1).

[16] Mazaheri, H., & Goli, S. (2022). UAV path planning based on butterfly optimization algorithm in three-dimensional space. *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, 10(2), 189–210.

[17] Wang, H. L. H. W. X. X. S. L. T., & R., W. (2024). Resource Allocation in UAV-D2D Networks: A Scalable Heterogeneous Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Approach. *Electronics*.

[18] Dave, D. K. D. N. S. A. P. R. D., & K., D. (2023). Drone-Enabled Load Management for Solar Small Cell Networks in Next-Gen Communications Optimization for Solar Small Cells.

[19] Xu, Z. Z. C. Z. S. M. G., & Z., C. (2024). Multimodal Transportation Route Optimization of Emergency Supplies Under Uncertain Conditions. *Sustainability*.

[20] Zhang, H. (2024). Offshore Oilfield Inspection Planning With Drone Routing Optimization. *IEEE Access*.

[21] Mazaheri, H., Goli-Bidgoli, S., & Nourollah, A. (2025). A review of 3D space path planning methods and algorithms. *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, 14(1), 55–89.

[22] Ronquillo, N. G. C.-S., & T., J. (2024). Integrated Beam Tracking and Communication for (Sub-)mmWave Links With Stochastic Mobility. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*.

[23] Zhang, X., Y., H., & L., L. (2023). Artificial Ecosystem Optimization combined with Deep Learning for Resource Allocation in Drone Networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 20(3), 1431–1442.

[24] Wang, D., L., Y., & Z., X. (2022). Swarm Intelligence Algorithms for Resource Allocation in Cooperative Drone Sensor Networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51(1), 121–133.

[25] Nobakht, P., Aminian Modarres, A. M., & Hodtani, G. A. (2025). Optimized Path Planning and Data Rate Enhancement in Traffic Monitoring UAV Systems: A Comparative Study of Metaheuristic Algorithms. *Journal of Information and Communication Technology in Policing*, 6(21). doi: 10.22034/pitc.2025.1283612.1357

[26] Abdelkader, F. M. M. Z., & R. S. R. A. G. M. (2020). Resource Allocation in Multi-UAV Systems Using Lotka-Volterra Models. *SpringerLink*, 8(4), 99–107.

[27] Anwar, S. H. Y., & L. A. G. (2021). Ant Colony Optimization for Path and Resource Allocation in UAV Networks. *Elsevier Journal on Systems*, 68, 13–22.

[28] Zhang, W., Y., L., & L., Y. (2021). Swarm Intelligence-Based Approaches for UAV Fleet Energy Management. *IEEE Access*, 9, 453–460.

[29] Taylor, P. J. (1983). *Distance Decay in Spatial Interactions*. Geo Abstracts.

[30] May, R. M., & Oster, G. F. (1976). Bifurcations and dynamic complexity in simple ecological models. *The American Naturalist*, 110(974), 573–599. doi: 10.1086/283092

[31] Chen, X., Li, J., & McCann, R. K. (2010). Spatio-temporal ecological modeling: periodic dynamics and environmental interactions. *Ecological Modelling*, 221(23), 2760–2770. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019