Islamic Azad University , Shiraz Branch
نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis
sanad.iau.ir/journal/jcdsa

یک استراتژی شارژ چند هدفه تحت عدم قطعیت برای شبکه‌های حسگر قابل شارژ بی‌سیم از طریق بهینه‌سازی استقرار چند پهپاد به کمک الگوریتم فراابتکاری

پیمان حبیبی[۱] ، گوران حسنی‌فرد*[۱]، عبدالباقی قادرزاده[۲]، آریز نصرت‌پور[۱]

۱- گروه مهندسی برق، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران
hassanifardgoran@gmail.com
۲- گروه مهندسی کامپیوتر، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران
b.ghaderzadeh@iausdj.ac.ir

چکیده: در این مقاله، به ارائه یک رویکرد برنامه‌ریزی برای مسیر حرکت پهپادهای قابل شارژ و زمان‌بندی شارژ گره‌های حسگر تحت عدم قطعیت در میزان انتقال داده و مصرف انرژی در گره‌ها با کمک الگوریتم‌های شاهین هریس و بهینه‌سازی مبتنی بر گرادیان پرداخته شده است. در این کار با در نظر گرفتن نابرابری‌ها و عدم قطعیت در محدودیت باتری و مصرف انرژی گره‌ها، استراتژی‌های زمان‌بندی جدید برای شبکه‌های حسگر قابل شارژ بی‌سیم به منظور افزایش توان عملیاتی شارژ و افزایش طول عمر شبکه ارائه شده است. در ابتدا با کمک اطلاعات موقعیت و انرژی باقیمانده گره‌ها، خوشه‌بندی گره‌ها به تعداد پهپادها توسط روش K-means ارائه شده است. سپس با توجه به تعریف تابع چندهدفه CUAV و به کمک الگوریتم‌های پیشنهادی، مسیریابی و زمان‌بندی شارژ هر یک از پهپادها از مبدا یکسان برنامه‌ریزی می‌شود. در تابع هدف تعریف شده تمام عدم قطعیت‌ها و نابرابری‌های شبکه برای تاخیر و مصرف انرژی و باتری گره‌ها لحاظ شده است. شبیه‌سازی تحت نرم‌افزار متلب انجام شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی مبتنی بر روش بهینه‌سازی شاهین هریس جواب‌های بهتری از لحاظ افزایش طول عمر شبکه و کاهش تاخیر و بهینه‌سازی مصرف انرژی توسط پهپادها را حاصل کرده است.

واژه های کلیدی: استراتژی شارژ چندهدفه، شبکه‌های حسگر قابل شارژ بی‌سیم، پهپادهای قابل شارژ، K-means، الگوریتم شاهین‌هریس

A non-disruptive multi-objective charging strategy for WRSN through multi-UAV deployment optimization using a meta-heuristic algorithm

Payman Habibi[1], Goran Hassanifard[1*], Abdulbaghi Ghaderzadeh[2], Arez Nosratpour[1]

[1] Department of Electrical Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran
hassanifardgoran@gmail.com
[2] Department of Computer Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran
b.ghaderzadeh@iausdj.ac.ir

Abstract:

Here, a planning approach for CUAVs movement path and charging schedule of sensor nodes under uncertainty in data transfer rate and energy consumption in nodes with the help of Harris Hawks Optimization (HHO) and gradient-based optimization (GBO) algorithms have been presented. By considering the inequalities and uncertainty in the battery limit and energy consumption of the nodes, we will achieve new scheduling strategies for WRSNs to increase the charging throughput and increase the network lifetime. Initially, with the help of information about the position and remaining energy of the nodes, clustering of the nodes into the number of drones has been done by the K-means method.

* نویسنده مسئول

According to the definition of the multi-purpose function of CUAV and with the help of the proposed algorithms, the routing and charging schedule of each of the drones is planned. In the defined objective function, all uncertainties and inequalities of the network are included for the delay and consumption of energy and battery of the nodes. The simulation was done under MATLAB software. The results showed that the proposed method based on HHO has achieved better solutions in terms of increasing the network lifetime and reducing the delay and optimizing energy consumption.
Keywords: Multi-target charging strategy, Wireless Rechargeable Sensor Networks (WRSN), CUAV, K-means, Harris Hawks Optimization (HHO).

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸ تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸

۱- مقدمه

یک شبکه حسگر بی‌سیم متشکل از تعداد زیادی از دستگاه‌های بسیار کوچک است که گره‌های حسگر نامیده می‌شوند [۱]. گره‌های حسگر عموماً مجهز به قابلیت‌های حسگری، پردازشی و ارتباطی هستند. گره-های حسگر از نظر مکانی توزیع شده هستند و شرایط مربوط به محیط اطراف خود را اندازه‌گیری می‌کنند. وظیفهٔ اصلی گره‌حسگر، جمع‌آوری نقاط داده در فواصل زمانی منظم و تبدیل آن به یک سیگنال الکترونیکی و انتشار سیگنال به گره‌ی سینک یا ایستگاه مبنا از طریق رسانه‌های ارتباطی بی‌سیم قابل اطمینان است. مهمترین دلیل پیدایش و توسعه شبکه‌های حسگر بی‌سیم، کاربردهای پایش مداوم محیط‌هایی بوده است که دستیابی و حضور دائمی انسان در آن‌ها، سخت یا ناممکن می‌باشد؛ در نتیجه معمولاً شارژ مجدد یا تعویض گره‌های مرده (از کار افتاده به دلیل اتمام منبع انرژی) امکان‌پذیر نمی‌باشد، زیرا همانطور که گفته شد این گره‌ها معمولاً در محیط‌ها و شرایط سخت، خشن و غیرقابل دسترس قرار گرفته و اغلب بصورت تصادفی و اقتضایی در محیط پراکنده می‌شوند [۲].

با توجه به ماهیت بی‌سیم حسگرها، آنها عمدتاً دستگاه‌هایی با باتری هستند و از این رو می‌توانند برای مدت زمان محدودی کار کنند [۳]. تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌ای از چند سال گذشته برای افزایش طول عمر گره‌های حسگر برای WSNها انجام شده است. روش‌های معمولی که برای بهبود طول عمر به کار می‌روند را می‌توان به دو بخش دسته‌بندی کرد. اولین بخش، معروف به "روش های موجود" برای به حداقل رساندن استفاده از انرژی در WSNها شامل پیاده‌سازی راه-حل‌های بی‌سیم کارآمد انرژی، معماری نرم‌افزاری کمتر پیچیده و طراحی سخت‌افزار کم‌مصرف است [۴]. اخیراً، پیشرفت‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، فناوری انتقال انرژی و شارژ بی‌سیم را قادر ساخته تا به طور موثر انرژی را به گره‌های حسگر تخلیه‌شده در یک محیط شبکه حسگر قابل شارژ بی‌سیم معمولی (WRSN) برساند. با این فناوری فعلی، فرآیند شارژ توسط یک وسیله نقلیه شارژ بی‌سیم (WCV) انجام می‌شود که به شارژ هر گره حسگر در شبکه کمک می‌کند. همیشه این احتمال وجود دارد که انرژی اکثر حسگرها در حالی که WCV در حال سرویس‌دهی به سایر گره‌های حسگر در شبکه است، تخلیه شود [۵]. بنابراین برای طراحی WRSN نیازمند یک استراتژی برای شارژ برنامه‌ریزی شده همه حسگرها می باشد تا بتوان طول عمر شبکه را افزایش داد.

راه حل دیگر، استفاده از روش‌های برداشت انرژی برای کاهش محدودیت‌های انرژی گره‌های حسگر با شارژ مجدد است. روش برداشت انرژی با رویکرد موجود متفاوت است، به گونه‌ای که روش‌های برداشت انرژی به حسگرها اجازه می‌دهد در صورت نیاز، انرژی دریافت کنند؛ که کاملاً بر مسئله سیستم وابسته به باتری غلبه می‌کند. برداشت انرژی از محیط به عنوان راه‌حل امیدوارکننده‌ای برای ایجاد اتصال مداوم در گره‌های حسگر در یک شبکه در نظر گرفته می‌شود و طول عمر شبکه را بالا می‌برد. با این حال، روش مناسب سازماندهی گره‌های حسگر ضروری است زیرا وسایل نقلیه مسئول شارژ مجدد گره‌های حسگر، می‌بایستی از قبل از بازدیدها آگاه باشد، بنابراین شارژ مجدد گره‌های حسگر کار آسانی خواهد بود. این بالاترین نرخ شارژ و کارایی را در WRSNها به همراه خواهد داشت. در این کار از پهپاد به‌عنوان وسیله نقلیه قابل شارژ گره‌ها استفاده شده است. علت آن هم عدم استفاده از مسیریابی پیچیده برای حرکت در بین حسگرها می-باشد و موانع حرکتی کمتری وجود دارد.

یک مساله مهم برای WRSN، کاهش زمان انتقال انرژی به گره-های بحرانی است. بنابراین در این مقاله از چند پهپاد قابل شارژ برای انتقال انرژی استفاده شده است. این کار، کمک خوبی به WRSN برای افزایش طول عمر شبکه می‌کند اما برنامه‌ریزی چند پهپاد برای شبکه، کار پیچیده‌ای است. بنابراین، در این مقاله، یک برنامه‌ریزی شارژ شبکه با تعریف یک تابع چندهدفه برای مسیریابی چند پهپاد از مبداء و خوشه‌بندی گره‌ها با روش k-mean بهره خواهیم برد. برای حل مساله که به‌عنوان یک مساله NP-Hard در نظر گرفته شده از دو الگوریتم بهینه‌سازی شاهین‌هریس (HHO) و بهینه‌سازی مبتنی بر گرادیان (GBO) استفاده شده است. نکته قابل توجه در این کار، تعریف تابع چند هدفه بر اساس نابرابری‌های اندازه انرژی باتری‌های شبکه و عدم قطعیت‌های موجود در توان مصرفی هر گره و توزیع کاملا تصادفی حسگرها درون شبکه است. استراتژی پیشنهادی، شامل یک راهکار نوآورانه برای افزایش طول عمر گره‌ها با ارائه یک برنامه شارژ مدون با کمک الگوریتم‌های فراابتکاری و چندین پهپاد با سرعت‌های مختلف می‌باشد.

در این کار، برای بررسی عملکرد طرح پیشنهادی از یک مدل واقعی در حضور عدم قطعیت‌های مربوط به شارژ توسط پهپادها استفاده شده و مصرف انرژی گره‌ها و محدودیت‌های شارژ، مختلف است. از جنبه های دیگر نوآوری استراتژی پیشنهادی، استفاده از یک خوشه‌بندی اختصاصی گره‌های حسگر برای برنامه شارژ متناسب با سرعت‌های مختلف پهپادها می‌باشد. به طورکلی، کار پژوهشی به شرح زیر تدوین شده است:

۱- خوشه‌بندی گره‌های WRSN به تعداد پهپادهای تعریف شده در شبکه بر اساس موقعیت گره‌های حسگر و انرژی باقیمانده هر گره.

۲- تعریف تابع چند هدفه بر اساس تاخیر مسیر پرواز پهپاد، طول مسیر، توان عملیاتی و انرژی باقی‌مانده هر گره و زمان شارژ هر حسگر.

۳- اختصاص هر خوشه به هر یک از پهپادها با سرعت‌های پرواز یکسان یا متغیر.

۴- حل مساله تابع چند هدفه با کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی شاهین‌هریس و بهینه‌سازی مبتنی بر گرادیان برای هر خوشه.

۵- مقایسه نتایج مربوط به طول عمر و زمان شارژ همه گره‌های بحرانی و میانگین انرژی باقیمانده.

بقیه مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. بخش ۲ بررسی مروری مقالات را نشان می‌دهد. بخش ۳ مفاهیم اولیه را با انگیزه یافتن توپولوژی بهینه برای راه‌حل کارآمد مساله، نشان می‌دهد و بخش ۴ تکنیک‌های پیشنهادی و تابع چندهدفه مرتبط با شبکه WRSN را مورد بحث قرار می‌دهد. بخش ۵ نتیجه کار پیشنهادی و تکنیک‌های موجود را مقایسه می‌کند. در نهایت بخش ۶ مقاله را با نتیجه‌گیری به پایان می‌رساند.

۲- کارهای مروری

مسئله شارژ در شبکه‌های حسگر قابل شارژ بی‌سیم و اینترنت اشیاء یک چالش تحقیقاتی رایج است. با استفاده از فناوری انتقال انرژی بی-سیم، می‌توان انرژی الکتریکی را از تجهیزات شارژ بی‌سیم (WCE) به حسگرها منتقل کرد و الگویی جدید برای افزایش طول عمر شبکه ارائه داد. تحقیقات موجود معمولاً از روش شارژ دوره‌ای و قطعی استفاده می‌کند، اما انرژی محدود WCE و تأثیر عوامل غیر قطعی مانند تغییرات توپولوژیکی و نابرابری توان مصرفی حسگرها را نادیده می‌گیرد و آنها را برای شبکه‌های واقعی نامناسب می‌کند. همچنین برنامه‌ریزی برای یک سیستم شارژ چندگانه از چالش‌های این کار به حساب می-آید. در این بخش به مطالعه و مقایسه کارهای انجام شده در این حوزه پرداخته می‌شود.

در [۶]، یک مسئله برنامه‌ریزی شارژ برای شارژرهای متعدد، یعنی مسئله حداکثرسازی بازده انرژی شارژ برای شارژرهای چندگانه در WRSNها (مسئله CEEM-MC) با هدف به حداکثر رساندن بازده انرژی شارژ فرآیند شارژ با اختصاص مقدار شارژ و برنامه‌ریزی مسیر شارژ، معرفی می‌شود و سختی NP آن را اثبات می‌کند. برای متعادل کردن مصرف شارژ در میان شارژرهای متعدد، دو الگوریتم Ring-Wandering و الگوریتم Eight-Wandering پیشنهاد شده که در برنامه‌ریزی مسیر شارژ متفاوت هستند. در [۷]، یک مسئله بهینه‌سازی استقرار شارژ وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین فرموله‌شده تا به طور مشترک تعداد گره‌های شبکه حسگر قابل شارژ بی‌سیم را افزایش دهد که در محدوده شارژ CUAVها، راندمان شارژ را در شبکه بهبود بخشد و مصرف انرژی حرکتی CUAV در طول مسیر را کاهش دهد. سپس، مساله با یک الگوریتم کرم شب‌تاب بهبود یافته (IFA) حل شده است.

مقاله [۸] یک طرح شارژ چند گره بر اساس تقاضا برای تقاضای حسگرها به دنبال یک مدل شارژ جزئی دوگانه پیشنهاد می‌کند. اول، برنامه‌های شارژ MCVها از طریق نقاط توقف بهینه با ادغام الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط (NSGA-II) و رویکرد تصمیم‌گیری چند ویژگی (MADM) تولید می‌شوند. سپس زمان شارژ در هر نقطه توقف برای SNها با کمک یک تایمر شارژ جزئی تعیین می‌شود. همچنین در [۹]، یک استراتژی شارژ فوری بر اساس تقاضا پیشنهاد شده است که ویژگی‌های حوزه مکانی، دامنه زمانی و حوزه رویداد گره‌ها را متحد می‌کند. این استراتژی چندین منطقه فرعی را بر اساس الگوریتم K-means بهبودیافته تشکیل می‌دهد و یک وسیله نقلیه شارژ بی‌سیم برای گره‌های شارژ در هر زیر منطقه اختصاص داده شده است. فاصله گره‌ها و WCV، انرژی باقی‌مانده گره‌ها و نرخ مصرف انرژی گام به گام یکپارچه و کوانتیزه می‌شوند، که اولویت شارژ واحد را شکل می‌دهد. اولویت شارژ واحد WCV را هدایت می‌کند تا گره‌ها را یک به یک در هر زیر منطقه شارژ کند. شبیه‌سازی‌ها، مزیت این استراتژی نسبت به دو استراتژی پیشرفته را نشان دادند.

در [۱۰]، یک سناریوی ترکیبی مساله فروشنده مسافر و مساله جهت‌یابی در نظر گرفته شده که در آن هدف بهینه‌سازی، به حداقل رساندن انرژی تخلیه‌شده خودروی تحویل نیرو و به حداکثر رساندن انرژی شارژ شده دستگاه‌ها است. در این مورد، یک برنامه‌ریز ماموریت سبک وزن و قابل اعتماد ارائه می‌کند که با ترکیب جستجوی آفلاین و ارزیابی مجدد آنلاین، با یک برنامه‌ریز مبتنی بر الگوریتم فرااابتکاری الهام گرفته از سیاه‌چاله، مساله را حل می‌کند. مقاله[۱۱] یک استراتژی شارژ مبتنی بر تقاضا برای WRSNها پیشنهاد می‌کند که برنامه‌ریزی شارژ را به چهار روش خوشه‌بندی، انتخاب گره‌های قابل شارژ، مسیر شارژ و زمان‌بندی شارژ بهبود داده است. ابتدا، یک الگوریتم خوشه‌بندی K-means (MIKmeans) چند نقطه‌ای برای متعادل کردن مصرف انرژی پیشنهاد شده که می‌تواند گره‌ها را بر اساس مکان، انرژی باقی‌مانده و سهم تاریخی گروه‌بندی کند. سپس، الگوریتم انتخاب پویا برای گره‌های شارژ (DSACN) پیشنهاد شد و انتخاب گره‌های شارژ بر اساس تقاضا انجام می‌شود. آنگاه، شبیه‌سازی تبرید بر اساس عملکرد و کارایی برای بهینه‌سازی مسیر شارژ برای یک وسیله نقلیه شارژ سیار و کاهش زمان شارژ طراحی شده است.

مقاله [۱۲] یک MMCCS آنلاین (استراتژی شارژ تعاونی چندگانه) برای شارژرهای موبایل چندگانه (MC) پیشنهاد می‌کند که پارتیشن استاتیک و همکاری پویا را فراهم می‌کند. هدف طرح توسعه‌یافته، حل مشکل نرخ بالای حفره انرژی در شبکه‌های حسگر

قابل شارژ بی‌سیم (WRSN) با پیشنهاد یک معماری شارژ بر اساس تقاضا است که نرخ حفره انرژی شبکه را به حداقل می‌رساند. به طور خاص، استراتژی مورد نظر با پارتیشن سرویس تجهیزات شارژ چند موبایلی و پارتیشن آستانه درخواست شارژ گره حسگر (SN) معرفی می‌شود. سپس بر اساس این مدل، برنامه‌ریزی مسیر شارژ آنلاین چند MC پویا و مشارکتی برای به حداقل رساندن نرخ حفره انرژی WRSN انجام می‌شود. در [۱۳]، استراتژی شارژ WCV در WRSN با در نظر گرفتن دو پدیده اهمیت گره‌های حسگر مختلف در انتقال داده و مصرف انرژی نابرابر، مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اهمیت گره حسگر که با فاصله تا ایستگاه پایه مرتبط است، گره‌های حسگر به دو نوع تقسیم می‌شود: گره‌های حسگر درون حلقه و گره‌های حسگر بیرون حلقه. یک مدل شارژ پیشنهاد می‌شود، WCV استراتژی‌های شارژ متفاوتی را برای گره‌های حسگر مختلف اتخاذ می‌کند. برای کارآمدتر کردن شارژ، WCV گره‌های حسگر را یکی یکی در درون حلقه شارژ می‌کند و سپس چندین گره حسگر را به طور همزمان در حلقه بیرونی شارژ می‌کند. برای تخمین طول عمر شبکه، یک متریک جدید به نام زمان مرده نرمال شده پیشنهاد شده است. به حداکثر رساندن طول عمر شبکه به عنوان به حداقل رساندن مجموع زمان مرده نرمال شده مدل می‌شود، و یک الگوریتم کارآمد برای به حداقل رساندن مجموع زمان مرده نرمال شده از طریق جستجوی دنباله‌های زمان شارژ بهینه پیشنهاد شده است. سپس، از طریق تخصیص مجدد زمان‌های شارژ گره‌های حسگر، الگوریتم حداقل هزینه سفر پیشنهادی فاصله سفر WCV را به حداقل می‌رساند و طول عمر شبکه را تضمین می‌کند. همچنین یک گره سرخوشه مستقر شده که ظرفیت باتری بیشتری در هر خوشه دارد و می‌تواند سایر گره‌های حسگر را در یک فاصله محدود شارژ کند. الگوریتمی برای پیش توزیع انرژی گره سر خوشه پیشنهاد شده است. در نهایت، عملکرد الگوریتم-های پیشنهادی توسط متلب تایید می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد WRSN را می‌توان با الگوریتم‌های پیشنهادی بهبود بخشید.

مقاله [۱۴] یک چارچوب به کمک وسیله نقلیه برای شارژ حسگرها در WRSN پیشنهاد کرده و یک مسئله زمان‌بندی شارژ زیستی را فرموله کرده، که در آن WCVها سفر خود را از یک ایستگاه پایه شروع می‌کنند، حسگرها را شارژ می‌کنند و در نهایت با یک دستگاه به ایستگاه پایه بازمی‌گردند. هدف این است که تعداد حسگرهای زنده را به حداکثر برساند و در عین حال کل انرژی مصرف شده برای حرکت WCV را به حداقل برساند. یک کران بالا درصد حسگرهایی که می‌توانند شارژ شوند نیز به دست می آید. در [۱۵]، یک WRSN مبتنی بر خوشه‌بندی سلسله مراتب تطبیقی کم‌انرژی (LEACH) در نظر گرفته شده و یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه استقرار MCV (MDMaOP) را برای شارژ گره‌های حسگر در محدوده‌های شارژ، فرموله می‌کند. از MCVها، مصرف انرژی حرکتی MCVها، انرژی باقیمانده گره با کمترین انرژی باقیمانده و فاصله بین MCVها و گره‌های حسگر به طور همزمان بهینه شده اند تا طول عمر شبکه را افزایش دهند. علاوه بر این، MDMaOP فرموله شده به عنوان NP-hard تجزیه و تحلیل و اثبات می‌شود. سپس، یک رویکرد بهینه‌سازی سریع و یک رویکرد بهینه‌سازی دقیق برای حل مسئله فرمول‌بندی‌شده و به منظور برآوردن نیازهای زمان و دقت محاسبه در سناریوهای مختلف پیشنهاد می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش‌های پیشنهادی برای افزایش طول عمر شبکه موثر بوده و از برخی الگوریتم‌های مقایسه دیگر بهتر عمل می‌کنند.

با توجه به مطالعات مختلف انجام شده، الگوریتم‌های هوش محاسباتی متعددی برای یافتن راه‌حل بهینه برای مسائل برنامه‌ریزی WRSN در دسترس هستند، اما همچنان، نیاز به دستیابی به الگوریتم بهینه‌سازی سرعت همگرایی سریع برای برنامه‌ریزی شارژ با متعادل کردن بهینه طول عمر شبکه حسگر و میانگین انرژی تلفاتی شارژرها وجود دارد. الگوریتم هوش محاسباتی جدید طراحی شده [۱۸] که در آن نویسنده ادعا می‌کند که الگوریتم HHO از نظر نتایج آماری در مقایسه با سایر بهینه‌سازهای معروف عملکرد بهتری دارد. بنابراین، جستجوی پیشرفته دقیق در مجلات تحقیقاتی معتبر نشان داد که این الگوریتم کارآمد جدید HHO تا کنون برای حل مساله تابع چند هدفه برنامه‌ریزی WRSN با کمک چند پهپاد استفاده نشده است. بنابراین سهم اصلی این مقاله عبارتند از:

۱- الگوریتم HHO جدید طراحی شده توسط حیدری و همکاران [۱۸] برای حل مشکل برنامه‌ریزی در WRSN استفاده می‌شود.

۲- اجرای کار پیشنهادی با استفاده از MatLab Tool ارائه شده است.

۳- طراحی مقاله با سایر الگوریتم‌های هوش محاسباتی مانند GBO مقایسه شده است.

۴- پارامترهای بررسی عملکرد برای کار پیشنهادی از نظر میانگین انرژی باقیمانده، هزینه تلفاتی انرژی، و تاخیر کل شارژ یک دوره.

۳- مفاهیم اولیه

۳-۱- معماری شبکه حسگر بی‌سیم قابل شارژ مورد مطالعه

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده، یک WRSN توسط چارچوب چندین CUAV بر اساس تقاضا پیکربندی شده که شامل چندین حسگر ثابت با ظرفیت باتری متغیر است که به طور تصادفی در یک منطقه خاص توزیع شده است. هر دو CUAV و گره‌ها به ماژول-های GPS (یا یک روش محلی‌سازی) و باتری‌هایی با ظرفیت محدود متفاوت مجهز هستند. وظیفه اصلی گره‌ها حس کردن، جمع‌آوری و ارائه اطلاعات از محیط است. گره‌ها تحت پروتکل پیش‌فرض (انتشار هدایت شده) با هم ارتباط برقرار می‌کنند. CUAVهای در حال انجام می‌توانند در کل منطقه نظارت شده حرکت کنند و انرژی را برای گره-های درخواست شارژ که انرژی آن‌ها کمتر از آستانه است، دوباره شارژ کنند. ایستگاه تعمیر و نگهداری وظیفه جمع‌آوری و ادغام داده‌ها برای کل منطقه تحت نظارت را بر عهده دارد، علاوه بر این، دارای ذخایر انرژی بی‌نهایت است و می‌تواند برای همه CUAVها شارژ شود.

۳-۲- بهینه‌ساز مبتنی بر گرادیان (GBO)

الگوریتم فراابتکاری اولین بار در سال ۲۰۲۰ توسط ایمان احمدیان‌فر و همکاران برای حل مسائل بهینه‌سازی مربوط به برنامه‌های مهندسی ارائه شد. کاوش و بهره‌برداری، دو مرحله اصلی در الگوریتم‌های فراابتکاری هستند که هدف آن‌ها بهبود سرعت همگرایی و یا اجتناب بهینه محلی از الگوریتم هنگام جستجوی یک هدف موقعیت است. به منظور ایجاد یک مبادله مناسب بین اکتشاف و بهره‌برداری، GBO مدیریت می‌شود تا از دو عملگر اصلی استفاده کند: قانون جستجوی گرادیان (GSR) و اپراتور محلی فرار (LEO). یک معرفی ساده از این الگوریتم در زیر توضیح داده شده است [۱۶].

۳-۳- قانون جستجوی گرادیان (GSR)

ابتدا، GBO اولین عملگر GSR را پیشنهاد می‌کند که به GBO کمک کند تا رفتار تصادفی را در فرآیند بهینه‌سازی در نظر بگیرد و همچنین کاوش و اجتناب از بهینه محلی را تسهیل کند. حرکت جهت-دار (DM) به GSR اضافه می‌شود که برای انجام یک فرآیند جستجوی محلی مناسب برای تسهیل سرعت همگرایی الگوریتم GBO استفاده می‌شود. بر اساس GSR و DM، از (۱) برای به‌روزرسانی موقعیت بردار فعلی (X^m_n) استفاده می‌شود [۱۶].

$$X1_n^m = x_n^m - randn \times \rho_1 \times \frac{2\Delta x \times x_n^m}{x_{worst} - x_{best} + \varepsilon} + rand \times \rho_2 \times (x_{best} - x_n^m) \quad (۱)$$

$$\rho_1 = x \times rand \times \alpha - \alpha \quad (۲)$$

$$\alpha = \left| \beta \times \sin\left(\frac{3\pi}{2} + \sin\left(\beta \times \frac{3\pi}{2}\right)\right) \right| \quad (۳)$$

$$\beta = \beta_{min} + (\beta_{max} + \beta_{min}) \times \left(1 - \left(\frac{m}{M}\right)^3\right)^2 \quad (۴)$$

که در آن β_{min} و β_{max} به ترتیب ۰/۲ و ۱/۲ هستند، m تعداد تکرارها و M تعداد کل تکرارها است. randn یک عدد تصادفی معمولی توزیع شده است و randn عدد کوچکی در محدوده [۰, ۰/۱] است. پارامتر ρ_2 را می‌توان با استفاده از (۵) محاسبه کرد [۱۶]:

$$\rho_2 = 2 \times rand \times \alpha - \alpha \quad (۵)$$

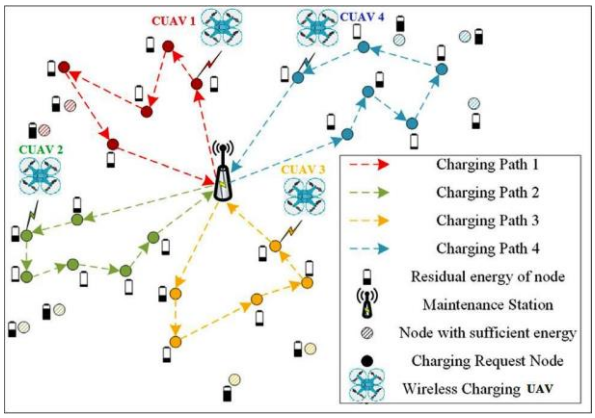
$$\Delta x = rand(1:N) \times |step| \quad (۶)$$

$$X2_n^m = x_{best} - randn \times \rho_1 \times \frac{2\Delta x \times x_n^m}{yp_n^m - yq_n^m + \varepsilon} + rand + \rho_2 \times (x_{r1}^m - x_{r2}^m) \quad (۹)$$

$$yp_n = rand \times \left(\frac{[z_{n+1} + x_n]}{2} + rand \times \Delta x\right) \quad (۱۰)$$

$$yq_n = rand \times \left(\frac{[z_{n+1} + x_n]}{2} - rand \times \Delta x\right) \quad (۱۱)$$

که در آن $rand(1:N)$ یک عدد تصادفی N بعدی است، r_1, r_2, r_3, r_4 که متقابلاً منحصر به فرد هستند، اعداد صحیح متفاوتی هستند که به طور تصادفی از $[1, N]$ انتخاب شده‌اند، مرحله یک اندازه گام است که با x_{best} و x_{r1}^m تعیین می‌شود.



شکل (۱): معماری شارژ بر اساس تقاضای WRSN با چهار CUAV [۴]

با جایگزینی موقعیت بهترین بردار (x_{best}) با بردار فعلی (X^m_n) برای (۱)، بردار جدید ($X2^m_n$) را می‌توان به صورت زیر تولید کرد:

$$step = \frac{(x_{best} - x_{r1}^m) + \delta}{2} \quad (۷)$$

$$\delta = 2 \times rand \times \left(\left|\frac{x_{r1}^m + x_{r2}^m + x_{r3}^m + x_{r4}^m}{4} - x_n^m\right|\right) \quad (۸)$$

بر اساس موقعیت‌های $X2^m_n$ و $X1^m_n$، موقعیت فعلی (X^m_n)، راه‌حل جدید در تکرار بعدی (X^{m+1}_n) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x_n^{m+1} = r_a \times (r_b \times X1_n^m + (1 - r_a) \times X2_n^m) + (1 - r_a) \times X3_n^m \quad (۱۲)$$

$$X3_n^m = X_n^m - \rho_1 \times (X2_n^m - X1_n^m) \quad (۱۳)$$

۳-۴- اپراتور محلی فرار (LEO)

اپراتور محلی فرار، دومین اپراتور معرفی شده توسط GBO است. LEO معرفی شده تا GBO همچنان در برخورد با مشکلات پیچیده با ابعاد بالا موثر باشد. LEO با استفاده از چندین راه‌حل، از جمله بهترین موقعیت (x_{best})، راه‌حل‌های $X2^m_n$ و $X1^m_n$، دو راه‌حل تصادفی X^m_{r2} و X^m_{r1}، و یک راه‌حل تصادفی جدید (X^m_k) بهترین مسیر را انتخاب می-کند. راه‌حل X^m_{LEO} توسط طرح زیر تولید می‌شود [۱۶]:

(۱۴)

if rand< pr
 if rand< 0.5

$$X_{LEO}^m = X_n^{m+1} + f_1 \times (u_1 \times x_{best} - u_2 \times x_k^m) + f_2 \times \rho_1 \times (u_3 \times (X2_n^m - X1_n^m) + u_2 \times (x_{r1}^m - x_{r2}^m))/2$$

$$X_n^{m+1} = X_{LEO}^m$$

 else

$$X_{LEO}^m = X_{best} + f_1 \times (u_1 \times x_{best} - u_2 \times x_k^m) + f_2 \times \rho_1 \times (u_3 \times (X2_n^m - X1_n^m) + u_2 \times (x_{r1}^m - x_{r2}^m))/2$$

$$X_n^{m+1} = X_{LEO}^m$$

 End
End

که در آن f_1 یک عدد تصادفی در بازه [-۱،۱] است. f_2 یک عدد تصادفی از یک توزیع نرمال با میانگین ۰ و انحراف استاندارد ۱ است،

pr احتمال است، و u_1,u_2,u_3 سه عدد تصادفی هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$u_1=L_1\times 2\times rand+(1-L_1) \quad (۱۵)$$
$$u_2=L_1\times rand+(1-L_1)$$
$$u_3=L_1\times rand+(1-L_1)$$

- که در آن L_1 یک پارامتر باینری با مقدار ۰ یا ۱ است. شکل ۲ نمودار جریان الگوریتم GBO را نشان می‌دهد.

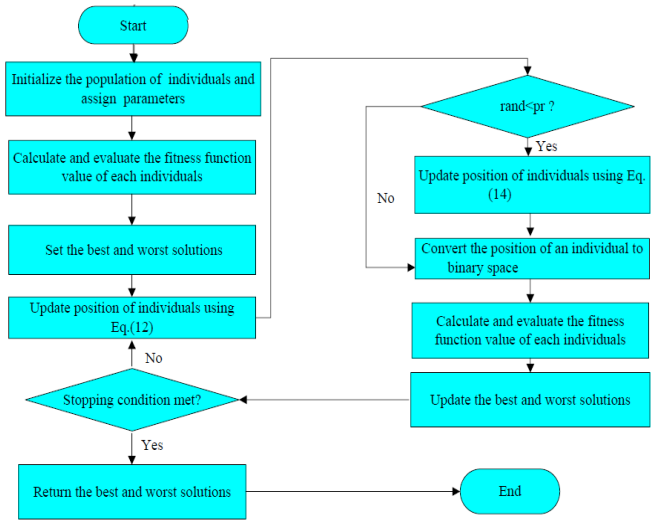
۳-۵- خوشه‌بندی k-means

خوشه‌بندی k-means یک روش کوانتیزاسیون برداری است که از پردازش سیگنال مشتق شده و برای تجزیه و تحلیل خوشه بندی در داده‌کاوی محبوب است. هدف k-means تجزیه n مشاهده به k خوشه است، جایی که هر مشاهده متعلق به خوشه‌ای با نزدیک‌ترین میانگین است، این میانگین به عنوان نمونه استفاده می‌شود. با توجه به مجموعه‌ای از مشاهدات $(x1,x2,x3,\dots,xn)$ که در آن هر یک از مشاهدات یک بردار حقیقی d بعدی است. خوشه‌بندی K-میانگین با هدف پارتیشن‌بندی n مشاهدات به $K\le N$ مجموعه $S=\{s1,s2,s3,\dots,sk\}$ است به طوری که مجموع مربع اختلاف از میانگین (یعنی واریانس) برای هر خوشه حداقل شود. تعریف دقیق ریاضی آن به شکل (۱۶) است [۱۷]:

$$arg_s\,min\sum_{i=1}^{k}\sum_{x\in S_i}\|x-\mu_i\|^2=arg_s\,min\sum_{i=1}^{k}|S_i|\,Var(S_i) \quad (۱۶)$$

که در آن μi میانگین نقاط در Si است. این معادل است با به حداقل رساندن دو به دو مربع انحراف از نقاط در همان خوشه[۱۷]:

$$\sum_{Cluster\ C_i}\sum_{Dimension\ d}\sum_{x,y\in C_i}(x_d-y_d)^2 \quad (۱۷)$$



شکل (۲): فلوچارت الگوریتم GBO [۱۶].

چون کل واریانس ثابت است، از قانون واریانس کلی می‌توان نتیجه گرفت که این معادله برابر است با بیشینه کردن مربع انحرافات بین نقاط خوشه‌های مختلف (BCSS) [۱۷].

۳-۶- بهینه‌سازی شاهین‌هریس (HHO)

حیدری و همکاران [۱۸] یک الگوریتم هوش محاسباتی الهام گرفته از طبیعت را پیشنهاد کردند که از سبک رفتاری شاهین‌هریس برای تعقیب طعمه استفاده می‌کند. چندین شاهین با همدیگر هجوم می‌آورند تا طعمه را غافلگیر کنند. شاهین‌هریس یک استراتژی تعقیب مشارکتی منحصر به فرد بر اساس شرایط طبیعت پویا و استراتژی‌های فرار از طعمه دارد. شاهین‌ها روحیه تیمی نوآورانه‌ای را برای تعقیب قدرت از نظر شکار، دور زدن و خارج شدن از شکار نشان می‌دهند. مراحل اکتشاف و بهره‌برداری از الگوریتم HHO به شرح زیر است:

- مرحله اکتشاف: در اکتشاف، شاهین‌هریس چشمان قدرتمند خود برای یافتن طعمه استفاده می‌کند. شاهین‌هریس به طور تصادفی در چندین مکان مستقر شده است و آنها امکان شکار را در دو موقعیت بر اساس مقدار q بررسی می‌کنند. اگر $q>0.5$ باشد، آنها به اندازه کافی به طعمه نزدیک هستند و روی بلندترین درخت تصادفی می‌نشینند که در (۱۸) مدل شده است.

$$X(t+1)=\begin{cases} X_{rand}(t)-r_1|X_{rand}(t)-2r_2X(t)| & q\ge 0.5 \\ X_{rand}(t)-r_1|X_{rand}(t)-2r_2X(t)| & q\ge 0.5 \end{cases} \quad (۱۸)$$

جایی که $X\ (t+1)$ به عنوان تکرار t بعدی موقعیت بردار شاهین نشان داده می‌شود، $X_{rabbit}(t)$ موقعیت فعلی خرگوش را نشان می‌دهد، (t) به عنوان موقعیت فعلی دستفروشان نشان داده می‌شود، r_1,r_2,r_3,r_4 و q دارای مقادیر تصادفی در بازه (۰، ۱) هستند، LB و UB حد بالایی و پایینی متغیرها هستند، $X_{rand}(t)$ به عنوان شاهینی که به طور تصادفی از جمعیت فعلی انتخاب شده است، نشان داده می‌شود. (t) به عنوان میانگین موقعیت فعلی شاهین نشان داده می‌شود. نمودار جریان HHO در شکل (۳) آمده است.

- مرحله بهره‌برداری: در مرحله بهره‌برداری، فرصتی برای حمله به طعمه‌ای که از قبل شناسایی شده است، وجود دارد.

۴- طرح پیشنهادی

در بحث برنامه‌ریزی شارژ شبکه‌های حسگر بی‌سیم قابل شارژ، رویکردهای مختلفی در مقالات مختلف اشاره شد. به منظور یک مدل‌سازی واقعی از WRSN، در این مقاله جوانب دقیقتر از برنامه‌ریزی لحاظ شد و نابرابری باتری حسگرها و عدم قطعیت در توان مصرفی حسگرها در تابع چند هدفه لحاظ شد. در این مورد یک مساله، مسیر حرکت وسیله نقلیه شارژر است که از یک سیستم انتقال هوایی پهپاد چندگانه استفاده شد تا دشواری‌های مسیر برای محیط‌های مختلف شهری و موانع جابجایی مانند درختان و ساختمان‌ها به خوبی کاهش یابد، و بتوان از مسیریابی مستقیم بین گره‌های حسگر استفاده نموده و پیچیدگی‌های مسیر حرکت سایر شارژرهای متحرک نداشته باشد.

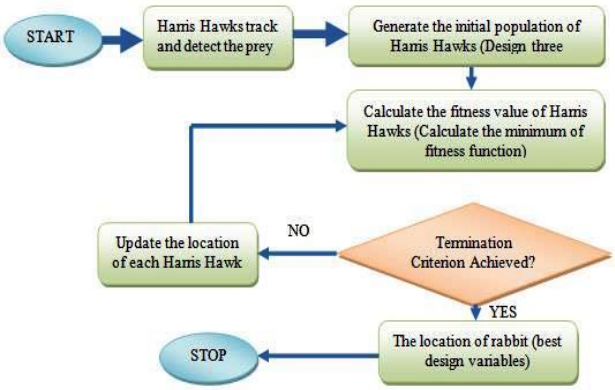
بنابراین پهپادها در مقایسه با سایر شارژرهای متحرک، توان مصرفی بین مسیر حرکت کمتری را شامل می‌شوند و به دلیل قابلیت حرکت در تمام موقعیت‌ها قادر خواهند بود در نزدیک‌ترین فاصله از حسگر برای انتقال بی‌سیم انرژی قرار گیرند. این عمل سرعت شارژ حسگرها را بالا می‌برد. زمان پرواز پهپادها به میزان قابل توجهی کمتر از سایر شارژرهای متحرک هستند. علت این مساله هم کوچک بودن منبع سوخت پهپادها در مقایسه با سایر شارژرهای متحرک است. بنابراین برای حل این مساله یک محدودیت زمان پرواز برای هر یک از پهپادها در تعریف تابع هدف گنجانده شده تا طبق برنامه شارژ اهداف گره‌های بحرانی انجام شود و سپس پهپادها به مرکز تعمیر و نگهداری برگردانده شود تا دوباره برای سوخت گیری آماده شود.در این کار برای طراحی و برنامه‌ریزی، موقعیت حرکت پهپاد در نزدیکی گره‌های حسگر برای شارژ فرض می‌شود. این کار تلفات توان و تاخیر برای انتقال انرژی از پهپاد به گره‌های حسگر (زمان شارژ) را به کمترین مقدار خود تعدیل می‌کند. نکته قابل توجه دیگر در مورد استفاده از پهپاد، ثابت بودن سرعت پهپاد در طول مسیر بین گره‌ها است که این کار هزینه محاسبات تاخیر مسیر و انرژی مصرفی را دقیق‌تر و ساده‌تر می‌کند. از طرفی هم استفاده از چند پهپاد حوزه استحفاظی شبکه برای هر پهپاد بهبود می‌یابد. با این تفاسیر با افزایش تعداد CUAVها مساله برنامه-ریزی را دچار چالش خواهد کرد. برای حل این مساله در این مقاله، یک الگوریتم خوشه‌بندی گره بر اساس موقعیت استراتژیک آنها و میزان درصد شارژ باتری باقیمانده، فضای محیطی شبکه WRSN را به تعداد پهپادها بخش‌بندی می‌کنیم و هر بخش را به یک پهپاد اختصاص می‌دهیم تا از تداخل برنامه شارژ حسگرها جلوگیری شود. در ادامه برای حل مساله برنامه‌ریزی یک شبکه با چند پهپاد را به چند شبکه با یک پهپاد اختصاصی تقسیم می‌شود. سپس، تابع چند هدفه برای هر بخش جهت مسیریابی پهپاد اختصاص یافته به آن حل می-شود. شکل (۴) نمودار استراتژی پیشنهادی برای حرکت پهپادها و شارژ حسگر را نمایش می‌دهد. در ادامه مراحل تشریح می‌شود:

۴-۱- مراحل استراتژی طرح پیشنهادی

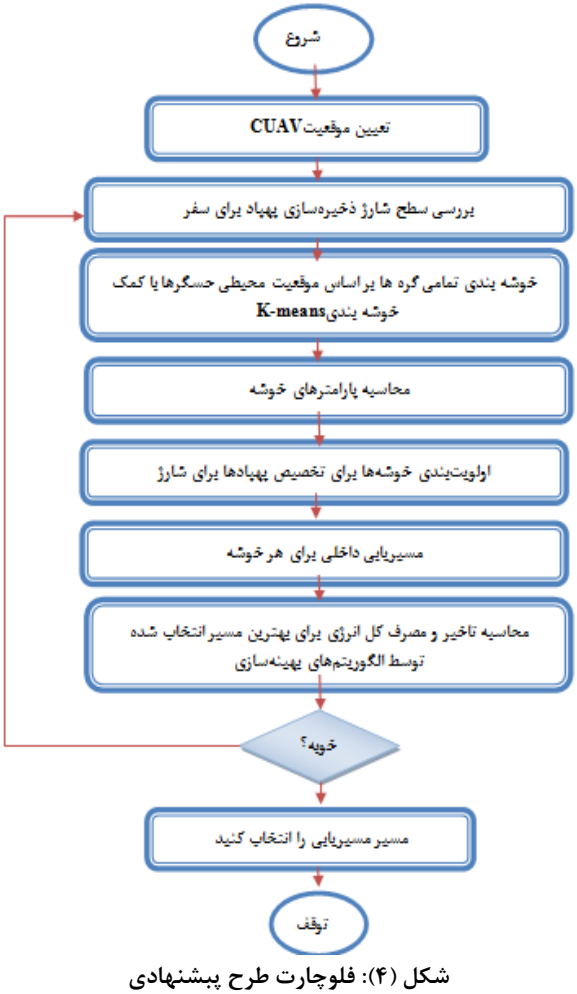
الف- تعیین موقعیت پهپاد: مکان تعمیر و نگهداری شبکه به‌عنوان محل تامین انرژی نامحدود CUAVها در این مطالعه در موقعیت مبداء مختصات در نظر گرفته می‌شود و موقعیت‌های بعدی در طول مسیر تعیین می‌شود. با تعریف محل ایستگاه شارژ پهپاد در مبداء، در هر دوره مسافرت، پهپاد به آشیانه برگشته و دوباره شارژ شود و برای دوره‌های بعدی آماده می‌شود. بقیه گره‌های حسگر در یک محیط تعریف شده به صورت تصادفی و استراتژیک پخش شده است.

ب- بررسی میزان شارژ ذخیره پهپاد برای مسافرت: در این مورد چک کردن توان ذخیره شده داخل باتری در هر دوره اتفاق می‌افتد تا به یک رویکرد بهینه برای شارژ دوباره پهپاد در ایستگاه شارژ برسیم. بر این اساس، در این تحقیق یک شرط نابرابری جهت تضمین وجود شارژ کافی برای پرواز و شارژ حسگرها در تابع هدف گنجانده می‌شود تا در هر دوره مسیری انتخاب کند که پهپاد اختصاصی بتواند کل مسیر را مسافرت کرده و به آشیانه برگردد. این شرط یک ضمانت‌کننده برای عمر بالای شبکه ایجاد می‌کند.

ج- خوشه‌بندی کل گره‌ها بر اساس موقعیت محیطی حسگرها با کمک خوشه‌بندی K-mean: در این قسمت بر اساس تعداد خوشه‌های معرفی شده که در این مقاله برابر تعداد پهپادها می‌باشد گره‌های در موقعیت نزدیک به هم، در یک گروه یا خوشه قرار می‌گیرد. معیار خوشه‌بندی برای شبکه محل قرارگیری گره‌ها و میزان شارژ باتری باقیمانده است. با این کار شبکه WRSN به بخش‌هایی تقسیم می‌شود که بر مبنای فاصله و انرژی، خوشه‌بندی می‌شود.



شکل (۳): فلوچارت بهینه‌ساز شاهین-هریس (HHO) [۱۸].



شکل (۴): فلوچارت طرح پیشنهادی

د- محاسبه پارامترهای خوشه: ۱- تعیین حسگرهای بحرانی با توان باتری باقیمانده کمتر از مقدار آستانه برای هر خوشه که ۶۰ درصد لحاظ شده است. ۲- میانگین انرژی باقیمانده گره‌ها در هر خوشه. ۳- فاصله متوسط گره‌های هر خوشه با مرکز ایستگاه شارژ.

ه – اولویت‌بندی خوشه‌ها برای اختصاص پهپاد جهت شارژ: در این مرحله هر خوشه به یک پهپاد اختصاص داده می‌شود. در صورت یکسان بودن مشخصات پهپادها از لحاظ سرعت پرواز، اختصاص پهپاد به هر خوشه کاملا تصادفی می‌باشد. اما برای موارد متفاوت بر اساس دو معیار، اختصاص پهپاد انجام می‌شود. بنابراین به خوشه‌های با میانگین انرژی باقیمانده گره‌ها کمتر و فاصله متوسط گره‌ها با مرکز ایستگاه شارژ بیشتر، پهپادهای سریعتر اختصاص داده می‌شود. در این مقاله از یک مدل پهپادی با سرعت متغیر استفاده شده است.

و - مسیریابی داخلی برای هر خوشه: برای هر خوشه به ترتیب پهپاد اختصاص داده شده مسیریابی حرکت پهپاد انجام می‌شود. برجسته‌سازی گره‌های حسگر بحرانی برای هر خوشه با آستانه‌گذاری قبلی، برای انرژی باقیمانده گره‌ها و حذف بقیه گره‌ها برای مسیریابی درون خوشه مورد نظراست. سپس تعریف تابع هدف بر اساس مدل پیشنهادی برای گره‌های حسگر انتخاب شده، وتعیین مینیمم تابع هدف با کمک الگوریتم های مورد مطالعه HHO و GBO با مقدار ۱۰۰۰ دوره تکرار برای هر الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ی- محاسبه تاخیر و انرژی مصرفی کل برای بهترین مسیر انتخاب شده توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی: در مسیریابی نهایی دو محدودیت انرژی و تاخیر بایستی بررسی شود. در مرحله نهایی بعد از تعیین مسیر حرکت پهپاد، نوبت به محاسبه تاخیر کل و میزان انرژی مصرفی کل می باشد. در صورتی که این میزان مقادیر با استانداردهای پهپاد مطابقت نداشت به مرحله دوم بازگشته تا به ایجاد تناسب اندازه شارژ پهپاد با میزان تقاضا پرداخته شود و سرعت پهپاد متناسب با تاخیر محاسبه شده تنظیم شود.

۴-۲- مدل‌سازی تابع هدف

در مدل ارائه شده در این کار ابتدا محاسبه تاخیر کل جابجایی و زمان شارژ حسگرهای بحرانی طول مسیرتعیین شده انجام می‌شود. روابط حاکم بر این محاسبات به شرح ذیل می باشد.

• محاسبه زمان کار باقیمانده MCV (پهپاد): ابتدا زمان کار باقیمانده MCV را مطابق زیر محاسبه می‌کنیم.

$$duration_{MCV}=\frac{\left(\sum_{i=1}^{n} d_{i-1,i}+d_{n.0}\right)}{v}+\sum_{i=1}^{n}\tau_i \qquad (۱۹)$$

که در آن $d_{i-1,i}$ نشان‌دهنده فاصله بین دو گره، $d_{n,0}$ نشان‌دهنده موقعیت ایستگاه تعمیر و نگهداری، v سرعت حرکت MCV است که برای پهپادها در این کار متفاوت انتخاب شده است.، و τi نشان‌دهنده مدت زمان MCV زمانی است که نزدیک گره i می‌ماند. هنگامی که زمان کار باقیمانده بیشتر از مدت زمان MCV باشد، گره اطمینان حاصل می‌کند که همیشه کار می‌کند [۱۹].

محاسبه حداقل زمان کار باقیمانده سنسور: حداقل زمان کار باقیمانده سنسور در WRSN با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$reT_{min}=\min\left(\frac{E_i(m)}{p_i(m)}\right) \quad 1\le i\le n \qquad (۲۰)$$

که در آن Ei(m) انرژی باقیمانده گره iام در خوشه mth و pi(m) نشان‌دهنده توان مصرفی گره iام است. این مقدار توان براساس یک مدل تحت عدم قطعیت از مصرف انرژی حسگرها در شبکه WRSN استفاده شده است. شرط برقراری استراتژی این است که زمان باقیمانده کار پهپاد از مینیمم مقدار زمان کار باقیمانده حسگرها کمتر باشد. با این محدودیت، شرط همگرایی و تصدیق مسیر تعیین شده در تابع هدف گنجانده شده است. مسیریابی پهپاد به ترتیب عبور از گره‌های تعیین شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی با اعمال این محدودیت‌ها تعریف می‌شود. با اعمال این شرط، احتمال مرگ گره‌های حسگر به صفر خواهد رسید. این شرط به صورت زیر اعمال می‌شود.

$$\text{Duration UAV (i)} < \text{reT(i)} \qquad (۲۱)$$

در این شرط، $Duration\ UAV\ (i)$ زمان رسیدن پهپاد به گره حسگر i ام می‌باشد و $reT\ (i)$ زمان باقیمانده از عمر گره‌ها است. این شرط برای تک تک گره‌ها تست و بررسی می‌شد و در تابع هدف لحاظ می‌شود. بعد از اعمال شرط تاخیر در مرحله اول، نوبت به محاسبه انرژی مصرفی برای مسیر پیشنهادی می‌رسد. در این مرحله دو مساله شارژ و تلفات انرژی توسط پهپاد بر حسب طول مسیر محاسبه می‌شود.

• مدل شارژ انرژی: مدل شارژ انرژی به عنوان مدل فضای آزاد فریس در (۲۰) تعریف شده است [۲۰].

$$P_r(d)=\frac{G_{tx}G_{rx}\eta}{L_p}\left(\frac{\lambda}{4\pi(d+\delta)}\right)^2 P_{tx} \qquad (۲۲)$$

که در آن G_{tx} بهره آنتن منبع، G_{rx} بهره آنتن گیرنده، η نشان‌دهنده بازده یکسوکننده، Lp نشان دهنده اتلاف پلاریزاسیون، λ طول موج، d فاصله شارژ پهپاد با گره حسگر است که در این کار برابر ۱ متر تعریف شده است. δ با مقدار ۰/۲۳۱۶ به عنوان پارامتر برای تنظیم معادله فضای آزاد فریس برای انتقال در فاصله کوتاه، و P_{tx} توان منبع MCV است. یک توان مصرفی برای باقیماندن پهپاد برای هر سنسور قابل محاسبه می‌باشد که این مقاله با Prch معرفی می شود.

• مدل انرژی مصرفی در طول مسافرت پهپاد: برای محاسبه انرژی مصرفی در طول مسافت طی شده توسط پهپاد، به دلیل سرعت یکسان حرکت پهپاد در طول مسیر، این مقدار انرژی هم در طول مسیر ثابت است. برای مدل‌سازی هم در این مورد از (۲۳) میزان انرژی مصرفی محاسبه می‌شود:

$$E_{tour}=\alpha.L \qquad (۲۳)$$

که در اینجا L کل طول مسافت طی شده در طول مسافرت یک دوره شارژ می‌باشد. α ضریب انرژی مصرفی MCV در طول مسیر خواهد بود که برای پهپاد در این مقاله برابر ۰/۸ j/m فرض شده است.

بر این اساس مقدار کل انرژی مصرفی در طول مسیر یک دوره مشخص به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{tot} = E_{tour} + \sum_{i=1}^{N} P_{UAV}.T_i + E_r \quad (۲۴)$$

که Er انرژی مورد نیاز برای شارژ کامل گره حسگر و Ti مقدار ماندن شارژر در کنار گره حسگر i می‌باشد و از (۲۵) محاسبه می‌شود.

$$T_i = E_r(i)/P_r(i) \quad (۲۵)$$

برای عملی شدن استراتژی پیشنهادی بایستی در روش پیشنهادی انرژی کل مصرفی (E_{tot}) از مقدار انرژی شارژ شده دوره‌ای پهپاد (EchUAV) کمتر باشد، تا UAV بتواند به طور کامل هم گره‌های بحرانی را شارژ کند و هم به ایستگاه تعمیر و نگهداری برگردد. بنابراین می‌بایست شارژ CUAV تا سقف تعیین شده انجام شود.

- مدل اولویت‌بندی گره‌های بحرانی حسگرها: یک روش مهم در این کار اولویت‌دهی به گره‌های حسگر مسیر برای رسیدگی زودتر برای شارژ تحت شرایط بحرانی است. بنابراین طبق این مدل، حسگرهای با درصد شارژ بالای آستانه (۶۰ درصد) از انتخاب مسیریابی حذف می‌شوند و حسگرهای با درصد شارژ پایین به ترتیب در اولویت انتخاب قرار می‌گیرند. رابطه زیر معرف تابع اولویت می‌باشد.

$$\text{Priority} = 1/(\sum \text{ROC}(\text{Z}(\text{i}))^{i}) \quad (۲۶)$$

که ROC_i معرف درصد شارژ باقیمانده گره $Z(i)$ام می‌باشد که گره انتخابی برای مسیر حرکت پهپاد به ترتیب اولویت iام می‌باشد.

۴-۳- مسیریابی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی (HHO و GBO)

بعد از انتخاب و اولویت‌بندی خوشه‌ها در هر خوشه گره‌های حساس و بحرانی که دارای انرژی باقیمانده کمتر از ۶۰ درصد هستند، انتخاب و برای شارژ توسط پهپاد برجسته و فعال می‌شوند. در این مرحله برای هر خوشه به ترتیب اولویت فازی مسیر پهپاد با کمک یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر گرادیان برای تابع هدف پیشنهاد شده زیر تعیین می‌شود. در هر خوشه، موقعیت اولیه پهپاد اختصاص یافته را آشیانه انتخاب کرده که در مرکز تعمیر و نگهداری در مبدا مختصات با موقعیت ۰و۰ معرفی می‌شود. مبنای تعریف تابع هدف در هر خوشه طول مسیر گره‌های انتخاب شده و وزن‌دهی هر گره حسگر بحرانی بر اساس تابع تعریف شده مدل ریاضی زیر می‌باشد.

$$\text{cost} = W_1 \times \text{dist} + W_2 \times \text{Priority} + W_{13} \times E_{uav} + W_1 \times T_{deltot} \quad (۲۷)$$

که dist طول مسیر مسافرت پهپاد در خوشه است. Priority معرف اولویت تعریف شده تحت گره‌های مسیر است. E_{uav} انرژی مصرف شده کل پهپاد در یک تور از دوره اجرا برای هر خوشه و T_{deltot} هم تاخیر کل مسیر طی شده و شارژ گره‌های مسیر است. مقادیر وزن‌های Wi به نحوی تعیین می‌شود که پارامترهای چند هدفه تابع را متعادل کند. در این جا Z شماره گره‌های انتخابی تحت الگوریتم در خوشه می‌باشد و به عنوان متغیرهای حل مساله معرفی می‌شود و ROC میزان نسبی توان باقیمانده گره‌های انتخابی Z می‌باشد که در بازه ۰و۱ تعریف شده است. در ادامه کد متلب تابع آورده شده است:

```
% define cost function for optimization;
function cost
= fitnessfunction(x0, y0, z, net, ROC, En, Pn, Vuav, Prch, ru)
W1 = 1;
W2 = 1000;
W3 = 1;
W4 = 1;
Z = round(z);
S = unique(Z);
B = numel(Z) − numel(S);
ROC = ROC/100;
x = net.x;
y = net.y;
% Inequality condition
if (B == 0 && isempty([find(Z < 1) find(Z
                > numel(x))]))
  for j = 1:numel(Z)
    dist(j) = tourdistance(x0, y0, Z(1:j), net);
    Tdelay(j) = sum(((1 − ROC(Z(1:j))).
                * En(Z(1:j)))./Prch(Z(1:j)))
                + dist(j)/Vuav;
  end
  Tdz = (ROC(Z).* En(Z))./Pn(Z);
  A = find(Tdelay > Tdz);
else
  A = 1;
end
% Main cost;
if isempty(A)
  dist = tourdistance(x0, y0, Z, net);
  Priority = 1;
  for i = 1:numel(Z)
    Priority = Priority + ROC(Z(i))^i;
  end
  Priority = 1/Priority;
  Euav = ru * dist + sum((1 − ROC(Z)).* En(Z));
  Tdeltot = sum(((1 − ROC(Z)).* En(Z))./Prch(Z))
                + dist/Vuav;
  cost = W1 * dist + W2 * Priority + W3 * Euav
                + W4 * Tdeltot;
else
    cost = (numel(A) + 1) * 1e4;
end
  end

% calculate distance;
function dist = tourdistance(x0, y0, Z, net)
x = net.x;
y = net.y;
if isempty([find(Z < 1) find(Z > numel(x))])
dist = sqrt(x0^2 + y0^2) + sqrt((x(Z(1)) − x0)^2
                + (y(Z(1)) − y0)^2);
for i = 2:numel(Z)
  dist = dist + sqrt((x(Z(i)) − x(Z(i − 1)))^2
                + (y(Z(i)) − y(Z(i − 1)))^2);
end
else
  dist = 1e5;
end
end
```

در این تابع چند هدف برای رسیدن به یک مینیمم جهانی از یک مدل محدب در دستورات شرطی استفاده کرده‌ایم. این عملیات شرایط محدودیت‌های موجود تعریف شده در تابع چند هدفه مسیریابی و برنامه‌ریزی را پشتیبانی می‌کند. در برنامه شارژ حسگرها بعد از اتصال پهپاد برای شارژ تا شارژ کامل و ۱۰۰ درصد ادامه خواهد یافت.

۵- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی تکنیک پیشنهادی، از یک مدلسازی واقعی برای مساله شارژ گره های حسگر در فضای مورد مطالعه با یک نسبت تقسیم بر ۱۰۰ برای مسافت طی شده و سرعت پرواز پهپادها بهره برده شد. همچنین برای تخمین زمان مسافرت پهپادها از یک مدل فضای آزاد فریس در (۲۸) تعریف شده است [۲۰].

$$P_r(d) = \frac{G_{tx}\, G_{rx}\eta}{L_P} \left(\frac{\lambda}{4\pi(d+6)}\right)^2 P_{tx} \qquad (۲۸)$$

که در آن Gtx بهره آنتن منبع، Grx بهره آنتن گیرنده، η نشان دهنده بازده یکسو کننده، Lp نشان دهنده از دست دادن پلاریزاسیون، λ طول موج، d فاصله شارژ پهپاد با گره حسگر است که در این کار برابر ۱ متر تعریف شده است. Ϭ مقدار ۱.۲۳۱۶ به عنوان پارامتر برای تنظیم معادله فضای آزاد فریس برای انتقال در فاصله کوتاه، و Ptx قدرت منبع MCV است. توان مصرفی برای باقی ماندن پهپاد برای هر سنسور قابل محاسبه می باشد که این مقاله با Puav معرفی می شود. در این بخش، آزمایش‌های شبیه‌سازی برای ارزیابی عملکرد استراتژی پیشنهادی برای برنامه‌ریزی WRSN با چند پهپاد انجام می‌دهیم.

۵-۱- مدل مورد مطالعه و شبیه‌سازی

همانطور که در جدول (۱) نشان داده شده، به طور تصادفی $\{۱۰۰\}$ گره در یک میدان مربع ۴۰۰ متری مستقر می‌کنیم. مختصات ایستگاه تعمیر و نگهداری در (۰،۰) است و شارژ پهپاد در آن انجام می‌شود. اطلاعات گره‌ها، پس از گرفتن توسط گره‌های جداگانه، به مرکز ایستگاه رله می‌شود. گره حسگر زمانی که انرژی باقیمانده زیر آستانه باشد، درخواست شارژ را به ایستگاه ارسال می‌کند. در شبیه‌ساز رویداد محور، داده‌های سنجش شبیه‌سازی می‌شوند، زیرا رویدادها در زمان‌های تصادفی و در مکان‌های تصادفی رخ می‌دهند. هرگاه رویدادی در محدوده گره حسگر رخ دهد، گره رویداد را گرفته و از طریق مسیر ساخته شده به BS ارسال می‌کند. فرآیند شارژ موبایل با استفاده از کد m-file در نرم‌افزار MATLAB2017B شبیه‌سازی شده است.

۶- نمایش نتایج

در این بخش، نتایج برای یک نمونه سیستم شکل (۵) برای تعداد ۱۰۰ گره حسگر قابل شارژ نمایش داده شده است. با اعمال روش استراتژی پیشنهادی ترکیبی منطق فازی با الگوریتم GBO و HHO، قادر خواهیم بود به نتایج مسیریابی برای حسگرهای بحرانی با درصد شارژ کمتر از ۶۰ درصد، دست یابیم. مبنای درخواست انرژی بی‌سیم از پهپاد را با آستانه‌گذاری بر روی انرژی باقیمانده می‌توان معرفی کرد. با تغییر این مقدار آستانه می‌توان تعداد گره‌های خوشه‌های مورد تقاضا برای شارژ را تغییر داد. با اعمال دو مساله عدم قطعیت در توان مصرفی حسگرها و نابرابری اندازه باتری شارژ حسگرها، به یک مدل واقعی در مساله برنامه‌ریزی شارژ حسگرها روبرو هستیم. شکل (۶) یک نمونه پاسخ سیستم را برای شبکه مورد مطالعه نمایش می‌دهد. فاصله ارتباط گره‌ها به یکدیگر را برابر ۱۰۰ تعریف می‌کنیم که بر اساس این فاصله حسگرهای با فاصله کمتر از هم قابلیت لینک را به هم خواهند داشت. در این تصویر مراحل اعمال تکنیک‌های شارژ پیشنهادی نمایش داده شده است. شکل (۶- الف) نتایج بخش‌بندی گره‌های حسگر بر اساس موقعیت با کمک الگوریتم k-means را نمایش داده است و سپس پارامترهای هر خوشه برای اختصاص پهپادها با سرعت‌های مختلف محاسبه و اعمال می‌شود. شکل (۶-ب) نیز نتایج مسیریابی با توجه تابع هدف تعریف شده در این مقاله با کمک الگوریتم GBO نمایش داده است. انتخاب مسیرها بر اساس حساسیت گره‌ها برای رسیدن شارژ انجام شده است. مطابق شکل (۶-الف) بر اساس سرعت پهپادها و موقعیت گره های بحرانی و متقاضی اضطراری انرژی شارژ به نواحی مختلف تقسیم می شود و هر پهپاد به هر خوشه از گره ها تخصیص داده شده است. سپس هر پهپاد با کمک تکنیک الگوریتم های HHO و GBO مسیریابی در هر خوشه توسط هر پهپاد از مرکز مختصات و تعمیر و نگهداری انجام می دهد و مطابق شکل (۶-ب و ج) بهترین مسیرها معرفی شده است. همچنین برای نمونه‌های دیگر شبکه با ۵۰ و ۳۰ گره هم در شکل‌های (۷-۸) نمایش داده شده است. در آخر مقایسه‌ای هم برای موارد مختلف انجام شده صورت گرفته است. در نمودار میله‌ای، نتایج مقایسه برای شبکه‌های با تعداد گره‌های مختلف در شکل (۹) نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش تعداد حسگرهای شبکه میزان انرژی مصرفی و فاصله و زمان مسافرت به خوبی کاهش خواهد یافت. بر اساس نمودار میله‌ای نمایش داده شده در شکل (۹) الگوریتم شاهین‌هریس در مقایسه با الگوریتم مبتنی بر گرادیان توانسته بهبودهای خوبی در پارامترهای مسافت کل طی شده و تاخیر کل و انرژی کل داشته است. در جدول (۲) مقایسه سه پارامتر مهم انرژی، زمان و طول مسافرت برای دو الگوریتم HHO و GBO با الگوریتمهای معمول شامل الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات با هم مقایسه و انجام شده که بر اساس نتایج، الگوریتم HHO جواب‌های بهتری حاصل کرده است. نتایج مورد بحث در این جدول برای شبکه با تعداد ۸۰ گره بررسی شده است. با توجه به مقایسه نتایج می‌توان گفت که الگوریتم‌های پیشنهادی HHO و GBO در مقایسه با الگوریتم‌های GA,PSO به نتایج قابل قبول در مقادیر مسافت کل طی شده در تور، انرژی کل مصرفی و تاخیر کل مسافرت ارائه کرده اند. علت بهبود نتایج می‌تواند جدید بودن الگوریتم‌های پیشنهادی و در عین حال سرعت بالای جستجوی روش-های پیشنهادی می‌باشد. همچنین در الگوریتم پیشنهاد شده با خوشه‌بندی گره‌ها و تقسیم بندی نواحی تحت نظارت گره‌ها می‌توان محدوده فضای جستجو را کاهش داد که در مقایسه با عملکرد سایر الگوریتم‌ها به تنهایی از پیچیدگی کمتر بر خوردار است.

نکته مهم برای تحلیل نتایج در این مقاله عملکرد تکنیک پیشنهادی برای تغییرات تعداد خوشه‌ها و سرعت پهپاد نمایش داده شده است. بنابراین، در شکل (۱۰) نمودار تغییرات تعداد پهپادها برای سیستم با ۱۰۰ گره حسگر نمایش داده است.

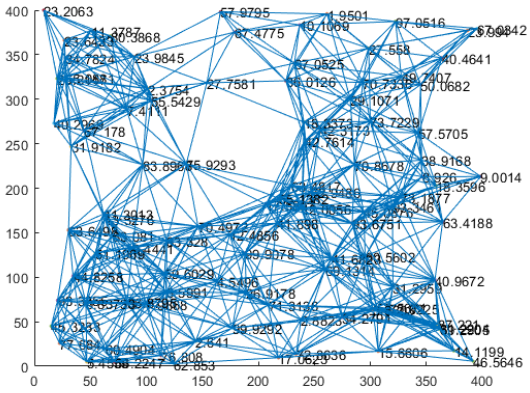
مطابق با شکل (۱۰) برای خوشه‌بندی با تعداد چهار خوشه توانسته‌ایم بهترین پاسخ برای عملکرد شارژ شبکه حسگر را حاصل کنیم که در میزان مصرف انرژی، تاخیر و طول مسیر مسافرت پهپاد بهترین پاسخ ها به‌دست آمده است. عملکرد الگوریتم‌های HHO و GBO برای ۱۰۰۰ دوره تکرار برای ردیابی مسیر برای شبکه با ۸۰ گره بررسی و برای هر خوشه در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

۷- نتیجه‌گیری

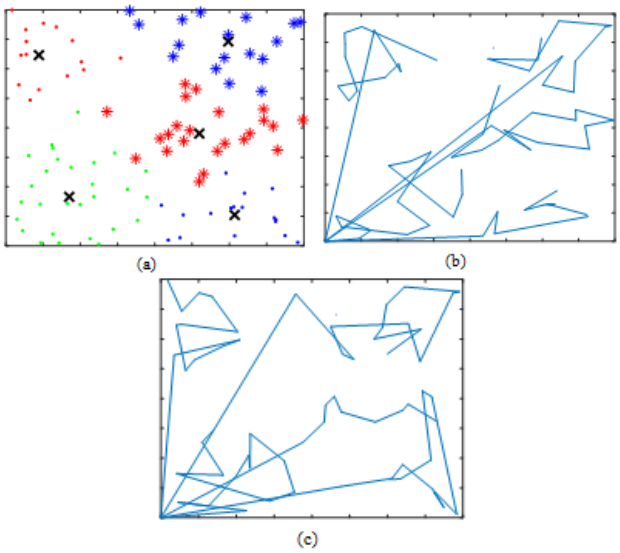
در این مطالعه، یک الگوریتم شارژ بی‌سیم بر اساس تقاضا با کمک چند پهپاد مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر گرادیان و شاهین-هریس پیشنهاد شده است. با استفاده از استراتژی ترکیبی خوشه‌بندی k-means و الگوریتم مسیریابی GBO، HHO می‌تواند به پهپاد در دستیابی به برنامه‌ریزی مسیر مستقل کمک کند. علاوه بر این، به طور کامل عملکرد پهپادها را با انرژی محدود و پاسخ به درخواست‌های شارژ را تحت عدم قطعیت‌های موجود در توان مصرفی هر گره و نابرابر باتری شارژ گره‌ها در نظر می‌گیرد. در این کار تلاش شده از مدل واقعی برای شبیه‌سازی شبکه WRSN استفاده شود و استراتژی‌های مختلف با هم مقایسه شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که HHO به خوبی توانسته است پارامترهای محاسبه شده شامل کل تاخیر شارژ و انرژی کل و مسافت طی شده را بهبود دهد. این استراتژی می‌تواند به طور موثر طول عمر شبکه و همچنین استفاده از شارژ چند پهپادها را تحت انرژی محدود پهپاد بهبود دهد. در آینده قصد داریم با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی متعدد و با توجه به ارائه یک مدل فضایی سه-بعدی برای پهپادها، این کار را گسترش دهیم.

جدول (۱): پارامترهای شبیه‌سازی

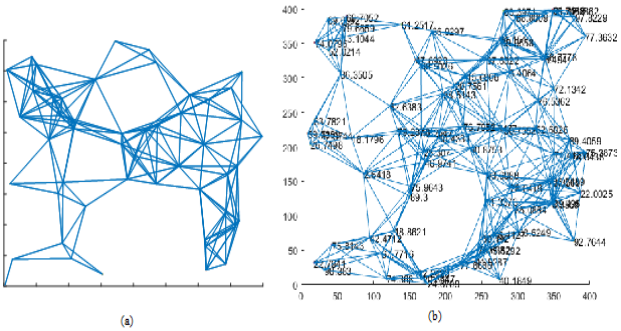
Parameters	Values
Node number	50,80,100
Field size (m^2)	400*400
Location of CS	0,0
Initial energy (J)	50+rand(N)*10
Battery capacity of MCV	1000 kj
Charging loss rate(ρ)	0.2
Energy threshold for sending a charging request	0.5Emax – 60%
UAV speed (m/s)	1-2-3-4-5
UAV charging efficiency (η)	0.5
UAV moving consumption (J/m)	0.8



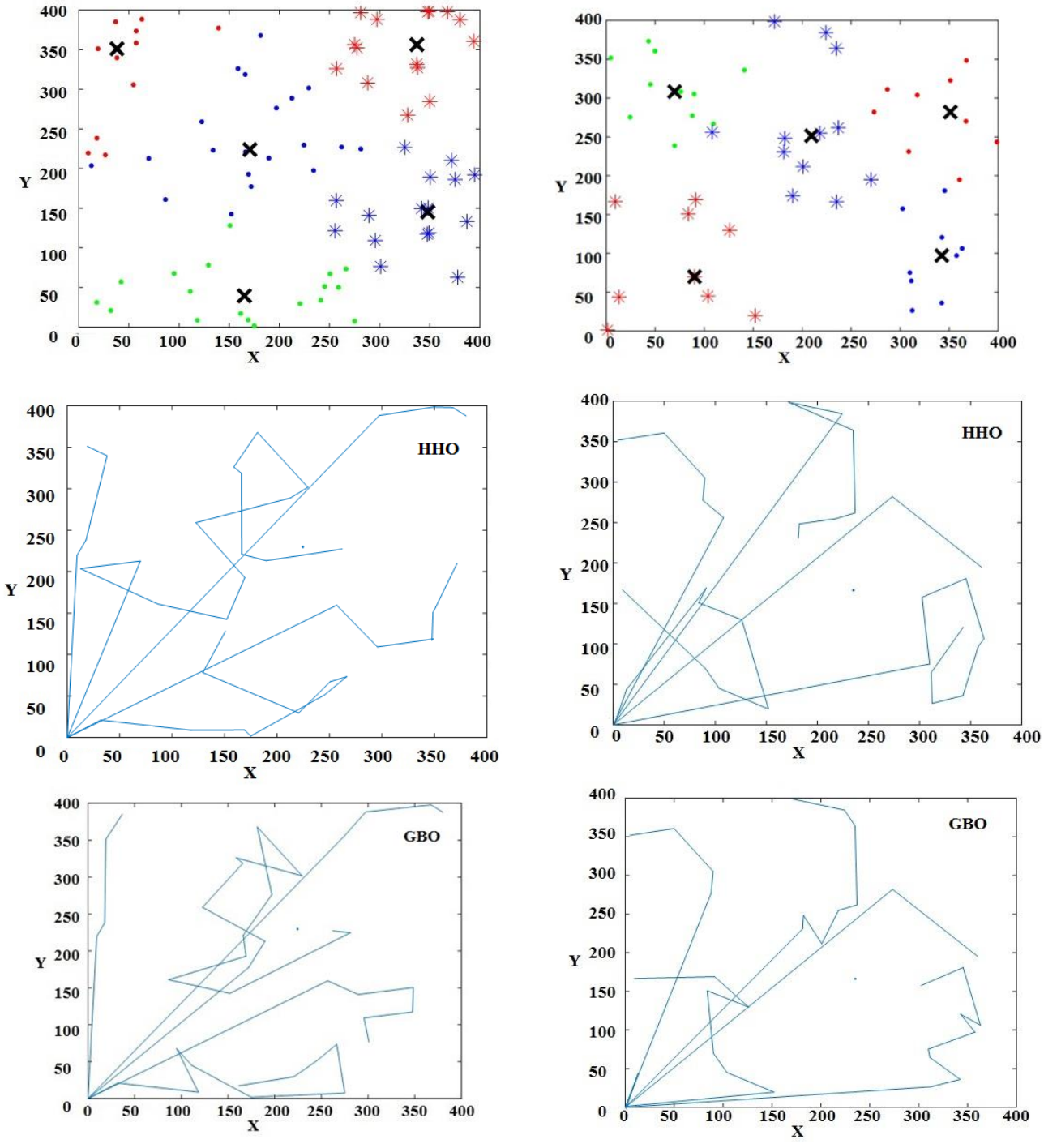
شکل (۵): نمایش شبکه حسگر قابل شارژ بی‌سیم با ۱۰۰ گره



شکل (۶): نمایش نتایج مسیریابی و خوشه‌بندی برای شبکه با ۱۰۰ گره. (a) – نتایج خوشه بندی (b) – مسیر یابی ۵ پهپاد شارژ با الگوریتم HHO. (c) – مسیر یابی ۵ پهپاد شارژ با الگوریتم GBO.



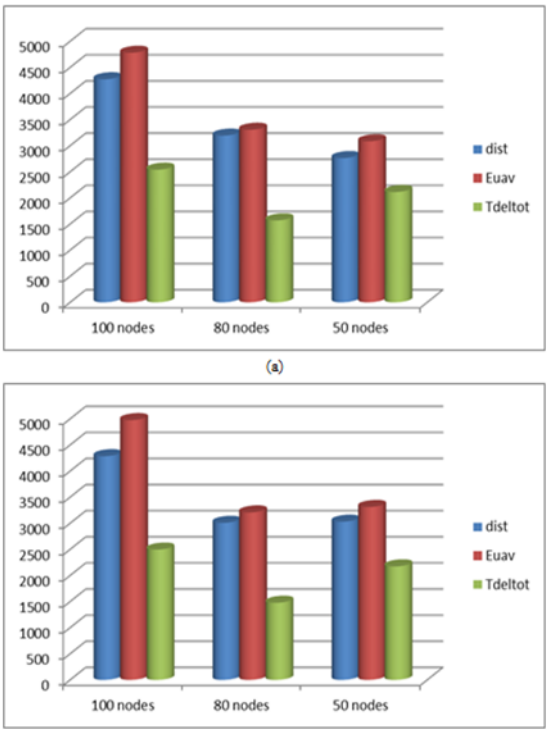
شکل (۷): نمایش شبکه حسگر قابل شارژ بی‌سیم با (a) – ۵۰ گره. (b) – ۸۰ گره.



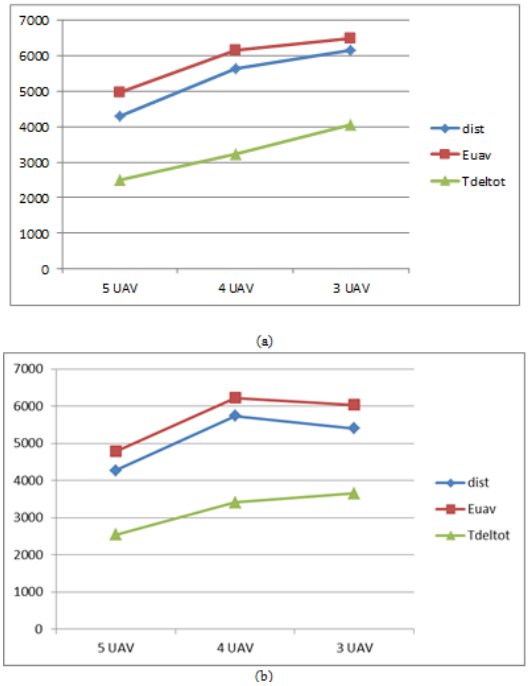
شکل (۸): نمایش نتایج مسیریابی و خوشه‌بندی برای شبکه با (a)- ۵۰ گره و (b)- ۸۰ گره.

جدول (۲): مقایسه الگوریتم‌های مختلف برای شبکه با ۸۰ گره حسگر

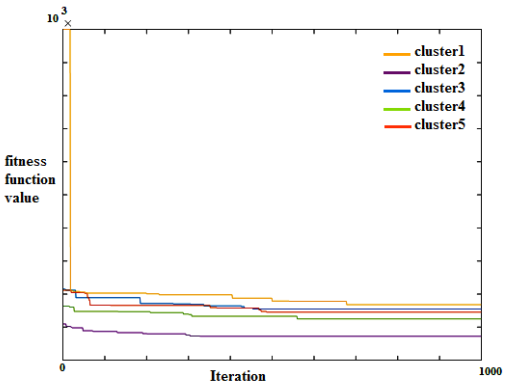
پارامترها	HHO	GBO	GA	PSO
مسافت کل طی شده در تور	۳۰۰۸/۳۸۹	۳۱۹۳/۶	۳۴۵۲/۴	۳۸۷۵/۷۶
انرژی کل مصرفی	۳۲۰۷/۹۲۳	۳۳۰۵/۷۴۲	۳۸۴۵/۳۴	۴۰۲۹/۹۸
تاخیر کل مسافرت	۱۴۷۷/۳۷۲	۱۵۶۹/۶۳۲	۲۱۰۳/۱۲	۱۷۸۶/۳۲۴



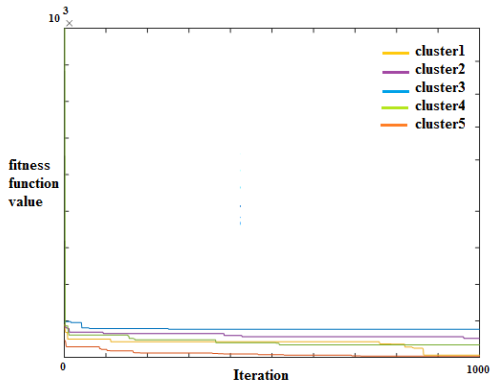
شکل (۹): نمودار میله‌ای مقایسه نتایج برای انرژی مصرفی و فاصله و زمان مسافرت با تغییر تعداد گره‌های حسگر (a) – HHO. (b) – GBO



شکل (۱۰): نمودار تغییرات تعداد پهپادهای شارژر بر نتایج. (a) – HHO. (b) – GBO



الف



ب

شکل (۱۱): نمایش عملکرد الگوریتم الف – GBO و ب – HHO برای هر یک از خوشه‌ها برای شبکه با ۱۰۰ حسگر.

مراجع

[1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications magazine*, vol. 40, pp. 102-114, 2002.

[2] G. V. Merrett, N. R. Harris, B. M. Al-Hashimi, and N. M. White, "Energy managed reporting for wireless sensor networks," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 142, pp. 379-389, 2008.

[3] S. Guo, C. Wang, and Y. Yang, "Joint mobile data gathering and energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, pp. 2836-2852, 2014.

[4] M. Angurala, M. Bala, and S. S. Bamber, "Performance analysis of modified AODV routing protocol with lifetime extension of wireless sensor networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 10606-10613, 2020.

[5] E. F. Orumwense and K. Abo-Al-Ez, "A Charging Technique for Sensor Nodes in Wireless Rechargeable Sensor Networks for Cyber-physical Systems," in *2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, 2021, pp. 1-6.

[6] Y. Hong, C. Luo, D. Li, Z. Chen, X. Wang, and X. Li, "Energy efficiency optimization for multiple chargers in Wireless Rechargeable Sensor Networks," *Theoretical Computer Science*, 2022.

[7] S. Liang, Z. Fang, G. Sun, C. Lin, J. Li, S. Li, *et al.*, "Charging UAV deployment for improving charging performance of wireless rechargeable sensor networks via joint optimization approach," *Computer Networks*, vol. 201, p. 108573, 2021.

[8] S. Priyadarshani, A. Tomar, and P. K. Jana, "An efficient partial charging scheme using multiple mobile chargers in wireless rechargeable sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 113, p. 102407, 2021.
[9] Y. Dong, G. Bao, Y. Liu, M. Wei, Y. Huo, Z. Lou, *et al.*, "Instant on-demand charging strategy with multiple chargers in wireless rechargeable sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 136, p. 102964, 2022.
[10] Q. Qian, J. OKeeffe, Y. Wang, and D. Boyle, "Practical Mission Planning for Optimized UAV-Sensor Wireless Recharging," *arXiv preprint arXiv:2203.04595*, 2022.
[11] Y. Dong, Y. Wang, S. Li, M. Cui, and H. Wu, "Demand-based charging strategy for wireless rechargeable sensor networks," *ETRI Journal*, vol. 41, pp. 326-336, 2019.
[12] Y. Jia, W. Jiahao, J. Zeyu, and P. Ruizhao, "Multiple Mobile Charger Charging Strategy Based on Dual Partitioning Model for Wireless Rechargeable Sensor Networks," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 93731-93744, 2022.
[13] M. Tian, W. Jiao, and J. Liu, "The charging strategy of mobile charging vehicles in wireless rechargeable sensor networks with heterogeneous sensors," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 73096-73110, 2020.
[14] R. Kumar and J. C. Mukherjee, "On-demand vehicle-assisted charging in wireless rechargeable sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 112, p. 102389, 2021.
[15] J. Li, G. Sun, A. Wang, M. Lei, S. Liang, H. Kang, *et al.*, "A many-objective optimization charging scheme for wireless rechargeable sensor networks via mobile charging vehicles," *Computer Networks*, vol. 215, p. 109196, 2022.
[16] Y. Jiang, Q. Luo, Y. Wei, L. Abualigah, and Y. Zhou, "An efficient binary Gradient-based optimizer for feature selection," *Math. Biosci. Eng*, vol. 18, pp. 3813-3854, 2021.
[17] H.-P. Kriegel, E. Schubert, and A. Zimek, "The (black) art of runtime evaluation: Are we comparing algorithms or implementations?," *Knowledge and Information Systems*, vol. 52, pp. 341-378, 2017.
[18] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, and H. Chen, "Harris hawks optimization: Algorithm and applications," *Future generation computer systems*, vol. 97, pp. 849-872, 2019.
[19] L. He, L. Kong, Y. Gu, J. Pan, and T. Zhu, "Evaluating the on-demand mobile charging in wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 14, pp. 1861-1875, 2014.
[20] T. Zou, S. Lin, Q. Feng, and Y. Chen, "Energy-efficient control with harvesting predictions for solar-powered wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 16, p. 53, 2016.