استقرار بهینه پهپادها بمنظور بهبود عملکرد شبکه در محیط شهری

تاریخ دریافت:
۲ آبان ماه ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:
۲۴ آذر ماه ۱۴۰۳

محمدرضا ذوقی*[۱]، علیرضا خلیلی[۲]

۱و۲. گروه مخابرات، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

چکیده

در سال‌های اخیر با افزایش کاربرد پرنده‌های هدایت‌پذیر از راه دور (پهپاد)، ایستگاه‌های پایه مبتنی بر پهپاد، جهت برقراری ارتباطات سریع و مقرون به صرفه با توجه به پرهزینه و وقت‌گیر بودن ساخت ایستگاه‌های پایه زمینی، به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این پژوهش به بررسی استقرار پهپادها به عنوان ایستگاه‌های هوا–پایه یا نقاط دسترسی می‌پردازد که در شرایط افزایش تقاضای شبکه و حفره‌های پوشش‌دهی در زیرساخت‌های موجود زمینی، ارائه خدمات بی‌سیم به کاربران، و بهبود کارایی شبکه در محیط شهری را برعهده دارد. از این‌رو، سه هدف طراحی حداقل تعداد پهپاد، موقعیت بهینه استقرار و تخصیص بهینه توان ارسال پهپاد مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای تحقق این اهداف، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر نسبت سیگنال به نویز به علاوه تداخل (SINR) پیشنهاد شده است؛ و با بهره‌برداری از فرم بسته تخصیص بهینه توان و SINR حاصل، روش مبتنی بر PSO پیشنهادی، دستیابی به مکان پهپاد را به‌صورت نسل به نسل بهینه می‌کند. در ادامه، روش مقدار دهی اولیه مبتنی بر خوشه بندی k-means برای بهبود عملکرد روش پیشنهادی، و روشی جهت کاهش توان ارسال کل پهپادها بیان شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌می‌دهد که با به‌دست آمدن ارتفاع بهینه پهپادها، ۳۸٪ بهبود در SINR دریافتی کاربران نسبت به ارتفاع اولیه خواهیم داشت.

واژه‌های کلیدی: استقرار بهینه پهپاد، نسبت سیگنال به نویز به علاوه تداخل، محیط شهری، بازدهی توان ارسال، بهینه‌سازی ازدحام ذرات

Optimal deployment of UAVs for improving network performance in the urban environment

Mohammad Reza Zoghi*[1], Alireza Khalili[2]

1,2. Department of Electrical and Computer Engineering, university of kashan, kashan, iran

Abstract

In recent years with the increasing use of unmanned aerial vehicles, UAV-based stations are widely used for establishing fast and cost-effective communications, considering the high cost and time-consuming nature of building ground-based stations. The study examines how air base stations or access points are used in cases of increased network demand and covering holes in existing ground infrastructure to provide wireless services to users to improve network performance in urban environments. Thus, the three design goals are the minimum number of UAVs, optimal position of deployment and Optimal allocation of UAV transmission power are investigated. To these goals, a method of particle swarm optimization based on signal-to-noise ratio plus interference (SINR) has been proposed. Also, by exploiting the shape of the optimal power allocation package and the resulting SINR, the proposed PSO-based method optimizes the acquisition of the UAV location generation by generation. Furthermore, a K-means clustering initial method has been presented to improve the performance of the proposed particle swarm optimization algorithm compared to the initialization algorithm and power reduction method to further reduce the total transmission power. The simulation results show that with the optimal UAVs height, improvement of 38% will be achieved by signal-to-interference plus noise ratio received by users.

Key words: optimal UAV deployment, signal-to-noise ratio plus interference, urban environment, Transmission power efficiency, particle swarm optimization.

ایمیل نویسنده مسئول: zoghi@kashanu.ac.ir

۱-مقدمه

استفاده از پهپادها[1] (UAVs) که عموماً به‌عنوان هواپیماهای بدون سرنشین شناخته می‌شوند، در طیف گسترده‌ای از برنامه‌های شبکه‌های بی‌سیم محیط شهری، به‌سرعت در حال رشد است. امروزه پهپادها در زمینه‌های مختلف ازجمله تصویربرداری هوائی، نظارت، امداد و نجات، نقشه‌برداری، حمل کالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. هنگامی‌که پهپادها، به‌عنوان ایستگاه‌های هوا-پایه استفاده می‌شوند، می‌توانند به‌عنوان نقاط دسترسی[2] (APs) سیار یا رله متحرک در پاسخ به تغییرات ترافیک داده در زمان واقعی عمل کنند [۱]. مزیت استفاده از پهپادها به‌عنوان ایستگاه‌های هوا–پایه در مقایسه با ایستگاه‌های پایه زمینی[3] (BSs) معمولی، توانایی آن‌ها در تغییر ارتفاع، اجتناب از برخورد با موانع، بهبود احتمال ایجاد لینک‌های ارتباطی دیدمستقیم[4] (LOS) و پوشش شبکه جامع‌تر برای کاربران زمینی است [۲]. با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها مانند وزن کم، انعطاف‌پذیری، تحرک، ارتفاع تطبیقی و کم‌هزینه بودن نسبت به ساخت یک ایستگاه پایه زمینی معمولی از آن‌ها می‌توان جهت افزایش عملکرد و بهبود در پوشش‌دهی محیط شهری بهره برد [۳]. علی‌رغم مزایای فراوان و کاربردهای عملی آن‌ها به‌عنوان ایستگاه‌های هوا–پایه، باید به چالش‌های فنی آن ازجمله، استقرار سه‌بعدی با حداقل تعداد، تجزیه وتحلیل عملکرد، مدل‌سازی کانال هوا به زمین[5] (ATG) و بهره‌وری انرژی نیز پرداخت [۴]. موقعیت‌یابی در هنگام استفاده از پهپادها برای پوشش دهی و بهبود کارایی شبکه، ایمنی عمومی، شهرهای هوشمند و برنامه‌های کاربردی اینترنت اشیا[6] (IOT)، یکی از نکات کلیدی طراحی است [۵]. قرارگیری سه‌بعدی بهینه پهپادها یک کار چالش‌برانگیز است، زیرا به عوامل زیادی مانند محیط استقرار، مکان کاربران زمینی و ویژگی‌های کانال هوا به زمین بستگی دارد که خود تابعی از ارتفاع پهپاد است. از طرفی موقعیت‌یابی هم‌زمان چندین پهپاد به دلیل تأثیر تداخل بین سلولی بر عملکرد سیستم، چالش‌برانگیزتر می‌شود [۶]. علاوه بر این، هنگام موقعیت‌یابی پهپادها، محدودیت‌های پرواز و انرژی آن‌ها نیز باید در نظر گرفته شود، زیرا آن‌ها به‌طور مستقیم بر عملکرد و کارایی شبکه تأثیر می‌گذارند [۷]. از این‌رو، بهینه‌سازی مکان استقرار پهپاد بسیار مهم است تا پهپاد قادر به ارائه حداکثر پوشش و توان عملیاتی بالا باشد. در [۸]، یک مدل کانال هوا به زمین سه‌بعدی قبل از اینکه ارتفاع بهینه به‌عنوان تابعی از حداکثر مسافت مجاز و پارامترهای محیطی استخراج شود، ارائه شد. بر اساس مدل کانال هوا به زمین، نویسندگان در [۹] طرحی را جهت تعیین مکان‌های سه‌بعدی پهپادها برای منطقه تحت پوشش ایجاد کردند. بااین‌حال طرح پیشنهادی در [۹] به محیطی بدون تداخل نیاز دارد که ممکن است برای استقرار واقعی پهپادها غیرعملی باشد. علاوه بر مسائل استقرار مورد بحث، مصرف انرژی پهپادها نیز یک مشکل چالش‌برانگیز برای شبکه‌های پهپاد است. ازآنجایی‌که پهپادها با باتری کار می‌کنند، با محدودیت‌های انتقال توان بسیار سختی مواجه هستند. در [۱۰]، پهپادها برای اینکه ارتفاع پرواز خود را تنظیم کنند، طراحی شدند تا مصرف انرژی را با تشخیص رویدادهای زمینی به حداقل برسانند. علاوه بر این نویسندگان در [۱۱] به‌صورت ریاضی مسئله تخصیص منابع را برای پهپادهایی که به‌عنوان نقاط دسترسی متحرک که در ارتفاع بالا حرکت می‌کنند مدل‌سازی کرده‌اند. در [۱۲] چارچوبی برای بهینه‌سازی استقرار و تحرک پهپادهای متعدد جهت جمع‌آوری داده‌های فراسو مرتبط با انرژی کارآمد از کاربران زمینی پیشنهاد شده است. همچنین در [۱۳]، یک رویکرد کارآمد برای یافتن مکان پهپادها، ارتباط دستگاه‌ها با آنها و توان انتقال بهینه لینک فراسو برای محدودیت‌های نسبت سیگنال به تداخل به‌اضافه نویز[7] (SINR) بمنظور به حداقل رساندن توان انتقال کل همه کاربران پیشنهاد شده است.

در این مقاله، مسئله استقرار را در یک محیط شهری بدون ایستگاه‌های پایه معمولی، با فرض این‌که اطلاعات موقعیت کاربران شناخته‌شده است بررسی می‌گردد. هر پهپاد باید در یک مکان ثابت سه‌بعدی مستقر شود و به‌عنوان ایستگاه هوا–پایه یا یک نقطه دسترسی عمل کند. با به حداقل رساندن تعداد پهپادها، بهینه‌سازی مکان‌های استقرار و توان انتقال آن‌ها با حداقل مقدار SINR برای همه کاربران بررسی می‌شود. علاوه بر این، استقرار پهپادهای بیشتر می‌تواند به‌طور بالقوه با هزینه‌ی تداخل بیشتر و شدیدتر به همان تعداد کاربر خدمات بهتری ارائه دهد، اما مدل کانال هوا به زمین پیچیده‌تر می‌گردد که این امر پیچیدگی بیشتری را به مسئله تحمیل می‌نماید.

ساختار مقاله بدین‌صورت است که در ادامه، در بخش۲ مدل سیستم جهت استقرار پهپادها ارائه می‌گردد. در بخش۳ روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات[8] (pso) پیشنهادی جهت تعیین محل استقرار پهپادها شامل مقداردهی اولیه k-means، بهینه‌سازی موقعیت پهپادها، الگوریتم تخصیص توان با SINR و روش کاهش توان بیان می‌شود. درنهایت، در بخش‌های ۴ و ۵ به ترتیب نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- مدل سیستم

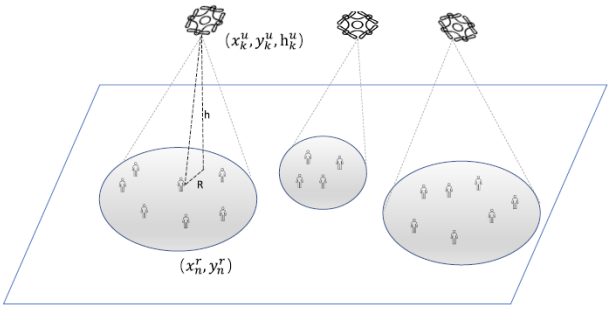
با توجه به اینکه پهپادها جهت سرویس و پوشش دهی به کاربران زمینی باید در یک مکان سه‌بعدی قرار گیرند و به‌عنوان ایستگاه هوا–پایه عمل کنند، سناریویی از استقرار K تا پهپاد برای سرویس‌دهی به Nکاربر تک آنتن در یک محیط شهری در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است $k \in \{1, 2, \cdots, K\}$ پهپاد، برای سرویس‌دهی به کاربران با مکان‌های سه‌بعدی $l_k = x_k^u, y_k^u, h_k^u$ در نظر گرفته شده است. فرض می‌شود که همه کاربران در یک محیط افقی قرار دارند که محل n–امین کاربر به‌صورت

[1] Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)
[2] Access Points (Aps)
[3] Base Stations (BSs)
[4] Line Of Sight (LOS)
[5] Air To Ground (ATG)
[6] Internet Of Things (IOT)
[7] Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)
[8] Particle Swarm Optimization (PSO)

$r_n = x_n^r, y_n^r$ برای $n \in \{1, 2, \cdots, N\}$ است؛ بنابراین فاصله بین k-امین پهپاد و n-امین کاربر به‌صورت زیر داده می‌شود:

$$d_{k,n} = \sqrt{(x_k^u - x_n^r)^2 + (y_k^u - y_n^r)^2 + (h_k^u)^2} \quad (۱)$$

براساس مدل تعریف‌شده، از پهپادهای ارتفاع پایین جهت ارائه‌ی حداکثر پوشش رادیویی استفاده می‌شود [۱۴]، که تابعی از پارامترهای آماری محیط شهری هستند.



شکل ۱- نمایی از استقرار k تا پهپاد

همچنین با توجه به اینکه تمرکز بر روی پوشش سیگنال است، اثرات محوشدگی در مقیاس کوچک در نظر گرفته نمی‌شود. درنتیجه افت مسیر کانال هوا به زمین بین k-امین پهپاد و n-امین کاربر را می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۱۵]:

$$PL_{k,n}^{dB} = \frac{\eta_{LoS} - \eta_{NLoS}}{1 + a\ e^{-b(\theta_{k,n} - a)}} + \tau \quad (۲)$$

که در آن

$$\theta_{k,n} = \frac{180}{\pi} \sin^{-1}\left(\frac{h_k^u}{d_{k,n}}\right)$$

و

$$\tau = 20\log(d_{k,n}) + 20\log f + 20\log\left(\frac{4\pi}{c}\right) + \eta_{NLoS}$$

که در آن، پارامترهای a و b ضرایب محیط و η_{LoS} و η_{NLoS} میانگین افت مسیر در حالت دید مستقیم و غیرمستقیم، $\theta_{k,n}$ زاویه‌ی ارتفاع، f فرکانس و c سرعت نور است. با فرض اینکه هر کاربر فقط می‌تواند به یک پهپاد متصل شود، ارتباط کاربر–پهپاد با تابع زیر مدل می‌شود:

$$A(n) = k \quad (۳)$$

اگر $p = [p_1, p_2, ..., p_N]^T$ بردار تخصیص توان باشد و در آن هر عنصر p_n توان ارسال n–امین کاربر باشد، SINR برای n–امین کاربر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma_n = \frac{p_n . PL_{A(n),m}^{-1}}{I_n + \sigma^2} \quad (۴)$$

در رابطه‌ی فوق I_n کل تداخلی است که n–امین کاربر از همه‌ی پهپادها دریافت می‌کند و رابطه‌ی آن به‌صورت زیر است:

$$I_n = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{N} \alpha_{A(m),n} \cdot \frac{p_m}{PL_{A(m),n}} \quad (۵)$$

که $\alpha_{A(m),n}$ ضریب میرایی بین A(m)–امین پهپاد و n–امین کاربر، ناشی از غیرمتعامد بودن کانال‌های ارتباطی [۱۶]، و σ^2 توان نویز حرارتی کاربر است.

اکنون مسئله استقرار پهپاد برای بهینه‌سازی مشترک تعداد پهپادهای مستقر، مکان و توان انتقال آن‌ها، مشروط به نیاز SINR هر کاربر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P1: \min_{p,\{l_k\}} \quad \mathrm{K} \quad (۶)$$

$$\text{subject to}: \ \Gamma_n \geq \Gamma_0 \quad (C_1)$$

$$\sum_n A_{k,n} . p_n \leq P_{k,\max} \quad \forall \mathrm{k} \in \mathrm{K} \quad (C_2)$$

$$l_k \in D \quad \forall \mathrm{k} \in \mathrm{K} \quad (C_3)$$

$$\left\| l_j - l_k \right\|_2 \geq \mathrm{d}_s \quad \forall j,k \in K \quad (C_4)$$

$$\sum_k A_{k,n} = 1 \quad \forall n \in N \quad (C_5)$$

که در آن $P_{k,\max}$ حداکثر توان انتقال k-امین پهپاد و d_s فاصله ایمن پهپاد است. علاوه بر این گاما صفر (Γ_0) و D به ترتیب حداقل SINR مورد نیاز و مجموعه‌ای از مکان‌های امکان‌پذیر پهپاد هستند.

با توجه به اینکه مسئله بهینه‌سازی در رابطه‌ی فوق غیرمحدب است، بنابراین حل آن به‌صورت تحلیلی دشوار خواهد بود. در نتیجه، از یک روش کارآمد استفاده می‌گردد که منجر به یک راه‌حل زیربهینه می‌شود.

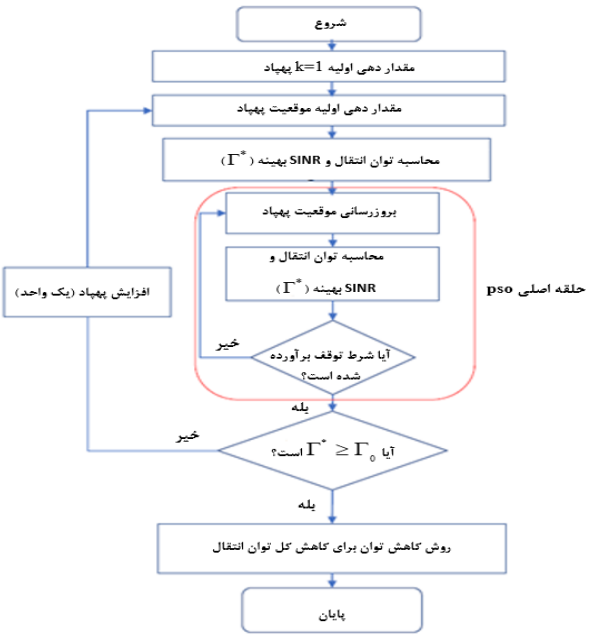
۳-الگوریتم PSO پیشنهادی برای تعیین محل استقرار پهپادها

برای مقابله با فضای جستجو با ابعاد بالا برای مکان‌های بهینه پهپاد، الگوریتم PSO تعریف می‌شود [۱۷]، به‌طوری‌که هر ذره، بردار مکان پهپاد را نشان می‌دهد. سپس با شروع از k تا پهپاد اولیه، بهینه‌سازی مشترک موقعیت‌یابی پهپاد و توان انتقال آن مطابق (۶) انجام می‌شود. اگر هر یک از SINR های حاصل نتوانند حداقل SINR موردنیاز هر کاربر را برآورده کنند، تعداد پهپادها یک واحد افزایش می‌یابد. این فرآیند تا زمانی که حداقل SINR همه کاربران برابر Γ_0 یا بیشتر شود، تکرار می‌گردد. هنگامی‌که فرآیند خاتمه می‌یابد، حداقل تعداد پهپادهای مستقر که به‌صورت K^* نمایش داده می‌شود، مشخص می‌شود. فلوچارت الگوریتم PSO پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳-۱- مقداردهی اولیه بر اساس الگوریتم خوشه‌بندی k-means

مقداردهی اولیه ذرات برای الگوریتم PSO مهم است. در مقایسه با مقداردهی اولیه تصادفی، مقداردهی اولیه K-means یک روش خوشه‌بندی برای تولید موقعیت‌های افقی ذرات نسل اول

است. به‌طور خاص، روش پیشنهادی، N کاربر را با به حداقل رساندن خطای زیر در خوشه‌های K گروه‌بندی می‌کند.



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم PSO پیشنهادی

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^{K}\sum_{n=1}^{N}\delta_{k,n}\left\|r_n - s_k\right\|^2 \qquad (۷)$$

$$\delta_{k,n} = \begin{Bmatrix} 1 & n \in C_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{Bmatrix} \qquad (۸)$$

که s_k مرکز k-امین خوشه است که به‌عنوان مکان افقی k-امین پهپاد نیز استفاده می‌شود. با توجه به اینکه s_k شامل x,y است، باید ارتفاع تولیدشده به‌صورت تصادفی به هر s_k اضافه شود تا $\tilde{s}_k$ ایجاد شود. سپس مقداردهی اولیه انجام می‌گیرد:

$$X_j^{(0)} = \left[\tilde{s}_1^T, \tilde{s}_2^T, ..., \tilde{s}_K^T\right]^T \qquad (۹)$$

درنهایت خوشه‌بندی K-means بالا برای J بار قبل از اینکه مجموعه‌ی $X_j^{(0)}$ به‌عنوان مکان‌های اولیه نسل اول پهپاد به دست آیند، تکرار می‌شود.

۳-۲- بهینه‌سازی موقعیت پهپادها بر اساس الگوریتم PSO پیشنهادی

در الگوریتم PSO پیشنهادی، بردارهای مکان $X_j^{(0)}$ از نسل اول برای $j = 1,2,...,J$ به‌عنوان مکان‌های اولیه پهپاد معرفی می‌شود. در ادامه الگوریتم به‌طور مکرر هر یک از بردارهای موقعیت J را در جهتی که منجر به بهبود مقادیر SINR شود، به‌روز می‌کند. برای هر بردار موقعیت در نسل i-ام، الگوریتم پیشنهادی یک روش کنترل توان با SINR را برای بهینه‌سازی توان انتقال تخصیص‌یافته به هر کاربر پیاده‌سازی می‌کند. برخلاف [۱۸] که در آن الگوریتم PSO برای به حداقل رساندن افت کل مسیر، از یک پهپاد برای سرویس‌دهی به همه کاربران استفاده می‌شود، در اینجا بهینه‌سازی مکان پهپادهای متعدد را برای بهبود مقادیر SINR کاربران در نظر می‌گیریم. درنهایت بردار مکان K تا پهپاد را با X به‌صورت زیر نشان می‌دهیم:

$$X = \left[l_1^T, l_2^T, ..., l_K^T\right]^T \qquad (۱۰)$$

۳-۳- الگوریتم تخصیص توان با نسبت سیگنال به نویز به‌علاوه تداخل

اکثر الگوریتم‌های تخصیص توان موجود ازنظر محاسباتی پیچیده هستند که استفاده از آن‌ها را در الگوریتم PSO که به‌طور مکرر مکان‌های پهپاد را نسل به نسل به‌روز می‌کند، غیرعملی می‌سازد [۱۹]. بدین ترتیب به‌جای به حداقل رساندن مستقیم کل توان انتقال، بر روی تخصیص توان انتقال که منجر به SINR بهینه برای همه کاربران می‌شود، تمرکز می‌شود [۲۰]. درنتیجه توان انتقال و SINR حاصل را می‌توان با حل رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$\frac{1}{\Gamma_n}.p_n = \sum_{\substack{m=1 \\ m\neq n}}^{N} \alpha_{A(m),n}.\frac{PL_{A(n),n}}{PL_{A(m),n}}.p_m + \sigma^2.\,PL_{A(n),n} \qquad (۱۱)$$

برای حل رابطه‌ی فوق ابتدا ماتریس G برای $n,m \in N$ تعریف می‌شود:

$$G_{n,m} = \begin{Bmatrix} \alpha_{A(m),n}.\dfrac{PL_{A(n),n}}{PL_{A(m),n}} & \text{if n} \neq \text{m} \\ 0 & \text{otherwise} \end{Bmatrix} \qquad (۱۲)$$

$$h = \sigma^2.\left[PL_{A(1),1}, PL_{A(2),2}, ..., PL_{A(N),N}\right]^T \qquad (۱۳)$$

سپس ماتریس C با ابعاد $(N+1)\times(N+1)$ به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$C = \begin{bmatrix} I_{N\times N} & 0_{N\times 1} \\ (A)_k & -p_{k,\max} \end{bmatrix} \qquad (۱۴)$$

که در آن $(A)_k$، k-امین ردیف ماتریس A است که در (۳) بیان شد. ازآنجایی‌که C یک ماتریس پایین مثلثی است، C^{-1} را می‌توان به‌صورت زیر به دست آورد:

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} I_{N\times N} & 0_{N\times 1} \\ -\dfrac{(A)_k.I_{N\times N}}{P_{k,\max}} & -\dfrac{1}{P_{k,\max}} \end{bmatrix} \qquad (۱۵)$$

درنهایت ماتریس D به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = \begin{bmatrix} G & h_{N\times 1} \\ \dfrac{(A)_k.G}{P_{k,\max}} & \dfrac{(A)_k.h}{P_{k,\max}} \end{bmatrix} \qquad (۱۶)$$

همچنین SINR حاصل با بردار تخصیص توان بهینه y^* توسط بردار ویژه D مربوط به بزرگ‌ترین مقدار ویژه λ^* به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma^* = \frac{1}{\lambda^*} \qquad (۱۷)$$

در الگوریتم PSO پیشنهادی، از SINR (Γ^*) برای به‌روزرسانی مکان‌های پهپاد در هر نسل استفاده می‌شود. اگر SINR ایجادشده از چندین نسل الگوریتم PSO نتواند مقدار SINR هدف (Γ_0) را برآورده کند، یعنی ($\Gamma^* < \Gamma_0$)، الگوریتم PSO تعیین می‌کند که تعداد فعلی پهپادها کافی نیست. درنتیجه پس از اضافه شدن یک پهپاد دیگر برای ارائه سرویس‌دهی، الگوریتم تکرار خواهد شد. در مقابل برای حالت ($\Gamma^* \geq \Gamma_0$)، الگوریتم PSO خاتمه خواهد یافت.

۳-٤- روش کاهش توان

با توجه به اینکه انرژی باتری پهپادها محدود است، بنابراین حفظ و ذخیره‌سازی آن بسیار مهم خواهد بود. یکی از ابزارهای عملی کاهش توان انتقال، راه‌حل توان انتقال بهینه (y^*)است. با توجه به اینکه SINR بهینه برابر یا بزرگ‌تر از SINR هدف ($\Gamma^* \geq \Gamma_0$) برای پهپادها و مکان‌های کاربر مشخص‌شده است، درنتیجه y^* بهینه خواهد بود. درنهایت می‌توان تغییراتی روی توان ارسال پهپاد انجام داد تا SINR حاصل با مقدار بسیار کمتری از SINR هدف فراتر رود. این مسئله می‌تواند به‌عنوان حداقل‌سازی ضریب α به‌صورت زیر نوشته شود:

$$P2: \min_{p,\{l_k\}} \quad \alpha \qquad (۱۸)$$

$$\text{subject to}: \Gamma_n \geq \Gamma_0 \qquad (C_1)$$

$$\sum_n A_{k,n}.p_n \leq \alpha P_{k,\max} \quad \forall k \in K \quad (C_2)$$

$$0 < \alpha \leq 1 \qquad (C_3)$$

با توجه به اینکه حداقل α^* توسط پهپادها محدودشده است و با فرض اینکه k-امین پهپاد با حداکثر توان خود ارسال انجام می‌دهد، داریم:

$$\sum_n A_{k,n}.p_n = \alpha^*.P_{k,\max} \qquad (۱۹)$$

با استفاده از (۱۶) ماتریس D' را می‌توان به‌صورت زیر تعریف نمود:

$$D' = \begin{bmatrix} G & h_{N\times 1} \\ \dfrac{(A)_k.G}{\alpha^*.P_{k,\max}} & \dfrac{(A)_k.h}{\alpha^*.P_{k,\max}} \end{bmatrix} \qquad (۲۰)$$

درنتیجه (۱۸) برای یافتن بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس D' با کاهش α برقرار است. ازآنجایی‌که $0 < \alpha \leq 1$ است، با شروع از $\alpha = 1 - \Delta\alpha$ جایی که $\Delta\alpha$ اندازه یک گام از پیش تعریف‌شده است، می‌توانیم مقدار α فعلی را به‌طور مکرر توسط $\Delta\alpha$ تا زمانی که بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس D' کمتر از SINR هدف شود، کاهش دهیم. درنهایت α^* که برابر با مقدار فعلی α است، به دست می‌آید.

٤-نتایج شبیه‌سازی

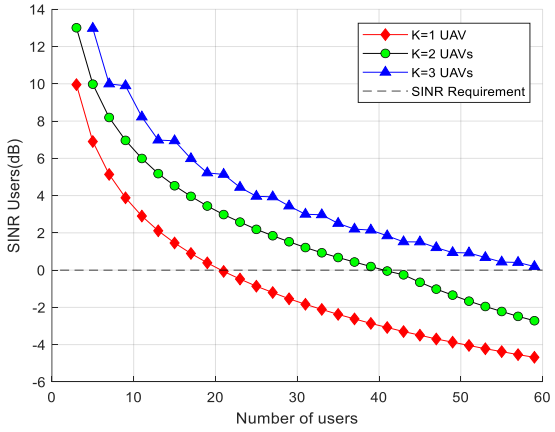
جدول زیر مقدار پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی ازجمله تعداد پهپاد، کاربران، منطقه جغرافیایی، توان ارسالی پهپاد و ... را بیان می‌نماید.

جدول ۱- پارامترهای شبیه‌سازی

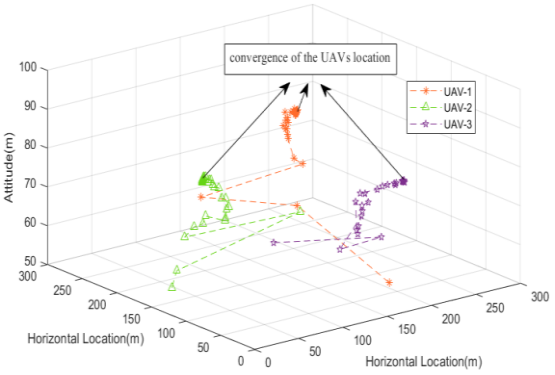
پارامتر	مقدار	واحد
تعداد کاربران	٦٠	عدد
تعداد پهپادها	3	عدد
منطقه جغرافیایی	300×300	متر
توان ارسال پهپاد	١٠٠	میلی وات
ارتفاع پهپاد	[٣٠-٩٠]	متر
ضرایب محیطی مدل‌سازی افت مسیر در محیط شهری (a و b)	$a = 9.60$ $b = 0.16$	-
میانگین افت مسیر در حالت دیدمستقیم (η_{nlos})	1	دسی‌بل
میانگین افت مسیر در حالت دید غیرمستقیم (η_{los})	20	دسی‌بل
ضریب میرایی درون‌سلولی (α_0)	٠.٠٥	نیوتن.ثانیه بر متر
ضریب میرایی بین سلولی (α_1)	٠.٠٠١	نیوتن.ثانیه بر متر
فرکانس سیستم (f)	٢.٤	گیگاهرتز
سرعت نور (c)	٣×١٠^٨	متر بر ثانیه
توان نویز (σ^2)	١٠^-١٠	میلی وات
مقدار آستانه SINR	٠	دسی‌بل

شکل۳ مقادیر SINR حاصل با مقداردهی اولیه PSO-Kmeans را نشان می‌دهد که در آن تعداد پهپاد مستقر به ترتیب $k = 1, 2, 3$ مقداردهی شده است. با توجه به شکل زیر برای تعداد کاربر کمتر از ۲۰ عدد، یک پهپاد می‌تواند ۲۰ کاربر را درحالی‌که SINR هر کاربر بالاتر از صفر دسی‌بل است، پوشش دهد. در ادامه، تعداد کاربران که از ۲۰ به ۴۰ عدد افزایش می‌یابد، SINR به دلیل افزایش تداخل، به‌تدریج به صفر دسی‌بل کاهش می‌یابد، زیرا کاربران بیشتری از طیف مشابه و حداکثر توان انتقال ثابت استفاده می‌کنند. هنگامی‌که N از ۲۰ کاربر افزایش می‌یابد، دو پهپاد جهت پوشش دهی و حداقل SINR صفر دسی‌بل به همه کاربران موردنیاز است. به‌طور مشابه، برای تعداد کاربران بیشتر از ۴۰ عدد، سه پهپاد جهت سرویس‌دهی به کاربران با حداقل SINR صفر دسی‌بل موردنیاز است. شکل۴ مکان‌های بهینه سه‌بعدی پهپادها که توسط روش پیشنهادی مبتنی بر PSO به‌دست‌آمده و نسل به نسل به‌روز شده است را نشان می‌دهد. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده ارتفاع پهپادهای اول،

دوم و سوم به ترتیب ۸۰/۸۸، ۷۶/۸۹ و ۸۰/۲۲ متر است که سه پهپاد پس از ۵۰ تکرار به سمت موقعیت‌های بهینه همگرا می‌شوند.



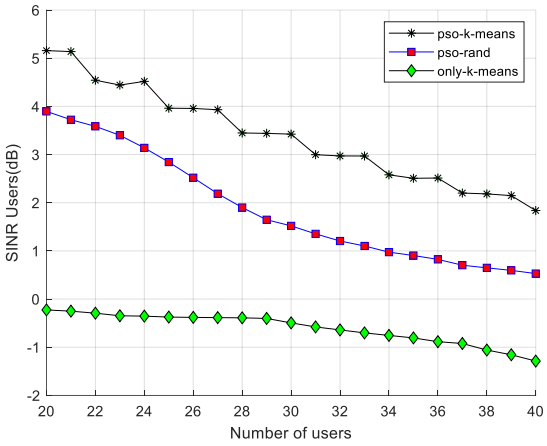
شکل ۳- مقادیرSINR برحسب تعداد کاربران و پهپادها



شکل ٤- به‌روزرسانی موقعیت‌های سه‌بعدی پهپادها

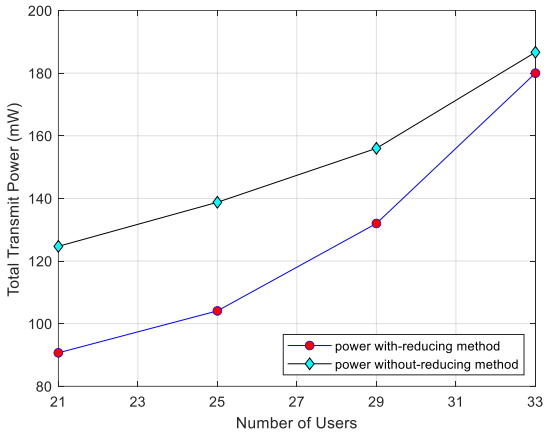
در شکل ۵ عملکرد روش پیشنهادی را برای میانگین SINR حاصل در حالت‌های مقداردهی اولیه به‌صورت تصادفی و k-means و همچنین فقط k-means، برای سه پهپاد و ۲۰ کاربر باهم مقایسه می‌شود. منحنی با برچسب فقط k-means عملکرد موقعیت پهپادها را بر اساس روش خوشه‌بندی k-means در مرکز خوشه نشان می‌دهد. با توجه به شکل، هر دو الگوریتم مبتنی بر PSO، عملکرد بهتری نسبت به فقط k-means دارند که نشان می‌دهد که مرکزهای خوشه‌ای مشتق‌شده از روش استاندارد خوشه‌بندی K-means بدون تکرار PSO، مکان‌های مناسبی جهت استقرار پهپادها نیستند. درنهایت با توجه به منحنی‌های مبتنی بر pso، PSO-K-Means عملکرد بهتری نسبت به PSO-Rand برای همه‌ی کاربران مورد آزمایش دارد، که مسئله‌ی روش خوشه‌بندی K-means که نقاط اولیه بهتری را فراهم می‌کند و منجر به مقادیر SINR بهتری می‌شود، را تائید می‌کند.

در ادامه، در شکل۶ عملکرد الگوریتم کاهش توان پیشنهادی را به ترتیب برای ۲۱، ۲۵، ۲۹ و ۳۳ کاربر با کل توان ارسالی ۲۰۰ میلی وات برای دو پهپاد، $\alpha^* = 0.1$ و شرط حداقل SINR صفر دسی‌بل نسبت به روش بدون کاهش توان، ارزیابی می‌کنیم.



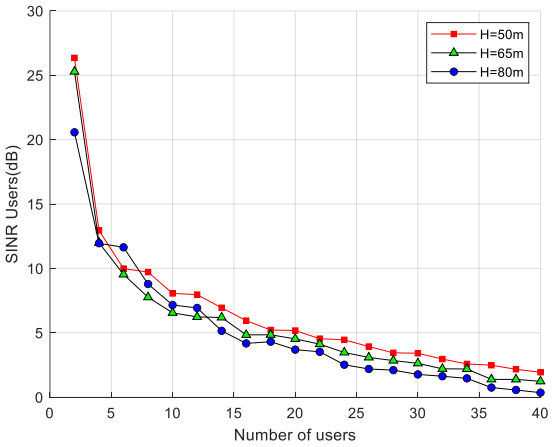
شکل ۵- مقایسه عملکرد SINR برحسب کاربران در حالت‌های مختلف

با توجه به شکل، منحنی آبی با نشانگرهای دایره‌ای و منحنی مشکی با نشانگرهای لوزی به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توان کل با روش کاهش توان پیشنهادی، و بدون آن است. همچنین با توجه به منحنی‌های شکل، روش کاهش توان به‌طور قابل‌توجهی، به‌خصوص زمانی که تعداد کاربران کم است، بازدهی توان ارسالی را بهبود می‌بخشد، ولی هر چه تعداد کاربران افزایش می‌یابد، مقادیر توان ارسالی توسط روش کاهش توان، مشابه مقادیر بدون روش کاهش توان می‌شود.



شکل ٦- کل توان ارسالی برحسب تعداد کاربران

شکل۷ مقادیر SINR دریافتی برحسب تعداد کاربران با ۳ پهپاد و ۴۰ کاربر، با ارتفاع‌های ۵۰، ۶۵ و ۸۰ متر را نشان می‌دهد. با توجه به منحنی‌های شکل، در حالت کلی هرچه تعداد کاربران افزایش می‌یابد مجموع SINR دریافتی کاهش پیدا می‌کند. از طرفی هرچه ارتفاع کمتر می‌شود، مقادیر SINR دریافتی کاربران افزایش می‌یابد. درنهایت حداکثر مقدار SINR حاصل برای ۴۰ کاربر، در ارتفاع 50 متر به دست می‌آید. همچنین مجموع SINR دریافتی برای ۴۰ کاربر با ارتفاع ۵۰ متر ۱/۸۵۱ دسی‌بل و برای دو ارتفاع ۶۵ و ۸۰ متر به ترتیب ۱/۳۸۰ و ۰/۳۵۰ دسی‌بل است.



شکل ۷- مقادیرSINR دریافتی برحسب تعداد کاربران

۵-نتیجه‌گیری و بحث

در این مقاله، استقرار و تخصیص توان انتقال بهینه با حداقل تعداد پهپاد توسط روش پیشنهادی، شرط حداقل SINR را برای کاربران در یک محیط شهری بررسی‌شده است. براین اساس، بدلیل محدب نبودن تابع هدف، مسئله اصلی به دو مسئله فرعی موقعیت بهینه پهپاد با کمترین تعداد، و توان انتقال بهینه تجزیه شد. به‌منظور دستیابی به مکان و توان انتقال بهینه پهپادها، رویکرد تخصیص توان انتقال با SINR بهینه در به‌روزرسانی هر نسل الگوریتم PSO اتخاذ گردید، که درنتیجه الگوریتم به‌طور مؤثر به سمت مکان‌های بهینه پهپاد همگرا شد. برای کاهش پیچیدگی محاسباتی الگوریتم، که بخشی از آن وابسته به تخمین اولیه مکان پهپادها می‌باشد، از روش خوشه‌بندی K-means برای مقداردهی اولیه مکان‌های پهپاد در الگوریتم PSO استفاده شد. در ادامه، روشی نیز برای کاهش بیشتر توان ارسالی ارائه گردید. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، عملکرد صحیح و بهبود روش پیشنهادی را با توجه به توان انتقال، موقعیت و ارتفاع بهینه پهپاد و SINR موردنیاز کاربران تائید کرده است.

٦-مراجع

[1] D. Zhai, H. Li, X. Tang, R. Zhang, and H. Cao, “Joint position optimization, user association, and resource allocation for load balancing in UAV-assisted wireless networks,” *Digit. Commun. Networks*, no. January, 2022.

[2] X. Yuan *et al.*, “Capacity Analysis of UAV Communications: Cases of Random Trajectories,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.67, no. 8, pp.7564 - 7576, 2018.

[3] X. Li, H. Yao, J. Wang, X. Xu, C. Jiang, and L. Hanzo, “A Near-Optimal UAV-Aided Radio Coverage Strategy for Dense Urban Areas,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 9, pp. 9098 -9109, 2019.

[٤] محسن احمدی و امیرحسین شکیبافر “مروری بر آشنایی با پهپادها و کاربردهای آن‌ها در مخابرات سلولی”، چهارمین کنفرانس بین‌المللی فناوری‌های نوآورانه در زمینه علوم، مهندسی و تکنولوژی، آذر ۱۳۹۹.

[5] M. Shabanighazikelayeh and E. Koyuncu, “Optimal UAV deployment for rate maximization in IoT networks,” *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC*, vol. 2020-Augus, no. 1, 2020.

[6] N. Namvar and F. Afghah, “Joint 3D Placement and Interference Management for Drone Small Cells,” *Conf. Rec. - Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput.*, vol. 2021-October, pp. 780–784, 2021.

[7] J. Yu, R. Zhang, Y. Gao, and L. L. Yang, “Modularity-based dynamic clustering for energy efficient UAVs-aided communications,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 7, no. 5, pp. 728–731, 2018.

[8] I. Moon, L. T. Dung, and T. Kim, “Optimal 3D Placement of UAV-BS for Maximum Coverage Subject to User Priorities and Distributions,” *Electron.*, vol. 11, no. 7, 2022.

[9] O. Cetinkaya and G. V. Merrett, “Efficient Deployment of UAV-powered Sensors for Optimal Coverage and Connectivity,” *IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. WCNC*, vol. 2020-May,2020.

[10] H. Jin *et al.*, “A survey of energy efficient methods for UAV communication,” *Veh. Commun.*, vol.41,2023.

[11] B. Perabathini, K. Tummuri, A. Agrawal, and V. S. Varma, “Efficient 3D placement of UAVs with QoS assurance in Ad Hoc wireless networks,” *Proc. - Int. Conf. Comput. Commun. Networks, ICCCN*, vol. 2019-July, pp. 1–6, 2019.

[12] Y. Liu, K. Liu, J. Han, L. Zhu, Z. Xiao, and X. G. Xia, “Resource Allocation and 3-D Placement for UAV-Enabled Energy-Efficient IoT Communications,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 3, pp. 1322–1333, 2021.

[13] M. Abrar, U. Ajmal, Z. M. Almohaimeed, X. Gui, R. Akram, and R. Masroor, “Energy Efficient UAV-Enabled Mobile Edge Computing for IoT Devices: A Review,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 127779–127798, 2021.

[14] A. V. Agrawal and M. Rawat, “Performance Analysis of AFD and LCR in 3-D MIMO Channels for LAP Airborne Communications,” *Proc. - 2019 Int. Conf. Electr. Electron. Comput. Eng. UPCON 2019*, pp. 1–5, 2019.

[15] C. Yan, L. Fu, J. Zhang, and J. Wang, “A Comprehensive Survey on UAV Communication Channel Modeling,” *IEEE Access*, vol. 7, pp.107769–107792, 2019.

[16] N. Tahiri, A. Azouaoui, and M. Belkasmi, “A novel detector based on the compact genetic algorithm for MIMO systems,” *Proc. - 2018 Int. Conf. Adv. Commun. Technol. Networking, CommNet 2018*, pp. 1–6, 2018.

[17] T. M. Shami, A. A. El-Saleh, M. Alswaitti, Q. Al-Tashi, M. A. Summakieh, and S. Mirjalili, “Particle Swarm Optimization: A Comprehensive Survey,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 10031–10061, 2022.

[18] A. Fahim and Y. Gadallah, “Optimized 3D Drone Placement and Resource Allocation for LTE-Based M2M Communications,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2020-May, 2020.

[19] P. Promponas, E. E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, “Rethinking Power Control in Wireless Networks: The Perspective of Satisfaction Equilibrium,” *IEEE Trans. Control Netw. Syst.*, vol. 8, no. 4, pp. 1680–1691, 2021.

[20] S. Maiti, M. Mikami, and K. Hoshino, “Experimental Evaluation on Doppler Spread Based Mobility State Decision Considering Moving Scatterers Using Actual Radio Propagation Data,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol.2017-June, 2017.