مکان‌یابی سه‌بعدی پهپادها و حداقل کردن تعداد پهپادهای مورد نیاز برای پوشش کاربران در یک شبکه ارتباطی بی‌سیم

مینا پیرخیبری[1]،زهرا رحیمی[2]، رضا قنبری[3]

[1]دانشجوی کارشناسی ارشد تحقیق در عملیات، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ mina.pkh1375@gmail.com
[2]دانشجوی دکتری تحقیق در عملیات ، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ rahimi.zahra@mail.um.ac.ir
[3] هیئت علمی دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ rghanbari@um.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، پیشرفت سریع تکنولوژی، فراگیرشدن ابزارهای هوشمند و نرم افزارهای قدرتمند موجب شده‌است تا نیاز به اینترنت با سرعت بالاتر و کیفیت بهتر بیش از گذشته احساس شود. سرعت و پهنای باند نسل های پیشین تلفن همراه قادر نیست تا به خوبی طیف گسترده‌ی نیازهای اینترنت دنیا را برآورده کند. به همین دلیل است که نسل پنجم اینترنت همراه[1](5G) به تازگی وارد دنیای تکنولوژی شده است. شبکه سلولی از تعدادی ایستگاه پایه زمینی[2](GBS) و تعدادی کاربر تشکیل شده است. استفاده از GBS ضعف‌هایی دارد. راه حل برطرف‌شدن این ضعف‌ها استفاده از ایستگاه‌های پایه متحرک[3](MBS) سوار بر پهپاد [4]می‌باشد در این پژوهش شبکه ای شامل تعدادی از کاربران را در نظر می گیریم که موقعیت آن‌ها در یک بازه زمانی کوتاه به ما داده شده است. هدف ما این است که با قراردادن کمترین تعداد ممکن پهپاد در مکان‌های مناسب، درصد مشخصی از کاربران(حداقل آلفا درصد) را پوشش بدهیم. با مدل‌سازی ریاضی مساله و حل آن، حداقل تعداد مناسب پهپاد و مکان بهینه سه‌بعدی آن‌ها مشخص می‌شود. بنابراین با جایگزین‌کردن ایستگاه‌های پایه زمینی با ایستگاه‌های متحرک سوار بر پهپاد می‌توانیم پوشش بیشتر و باکیفیت‌تری برای کاربران شبکه بی‌سیم داشته‌باشیم.

کلمات کلیدی: ایستگاه پایه زمینی؛ ایستگاه پایه متحرک؛ نسل پنجم اینترنت ؛ پهپاد ؛ مکان‌یابی

1- مقدمه

امروزه استفاده از پهپادها به دلیل طیف گسترده‌ی کاربردهایی که دارند، اهمیت ویژه‌ای یافته‌است. پهپادها به علت قابلیت حرکت، انعطاف‌پذیری و سازگاری با ارتفاع‌های مختلف، یکی از بهترین گزینه‌ها به عنوان ایستگاه پایه متحرک در شبکه‌های بی‌سیم هستند. پهپادها این قابلیت را دارند تا ظرفیت پوشش شبکه‌های بی‌سیم را افزایش داده و عملکرد این شبکه‌ها را بهبود بخشند. چالشی که استفاده از پهپادها به دنبال دارد این است که باید موقعیت استقرار پهپاد یا مسیر حرکت آن به صورت بهینه پیدا شود تا بتوانند بیشترین کیفیت ممکن سرویس‌دهی را فراهم کنند. در این مقاله ما روی مساله مکان‌یابی تمرکز داریم که می‌تواند به عنوان بخشی از حل مساله مسیریابی قرار بگیرد.

بنابراین مکان‌یابی پهپاد یعنی پیداکردن مکان مناسب برای یک یا تعدادی پهپاد به صورت دوبعدی یا سه بعدی(ارتفاع نیز

[1] Fifth generation
[2] Ground base station
[3] Mobile base station
[4] UAV

متغیر باشد) در شبکه ارتباطی، به نحوی که عملکرد شبکه ارتباطی به بهترین نحو باشد. در زمینه مکان‌یابی مطالعات قابل توجهی انجام گرفته‌است که در ادامه برخی از آن‌ها را ذکر می‌کنیم:

بوریس گالکین و همکاران[1] در پژوهش خود عملکرد یک پهپاد در ارتفاع پایین[5] را بررسی می‌کنند که در یک منطقه شهری به مجموعه‌ای از کاربران هات اسپات[6] خدمت‌رسانی می‌کنند. محمد الزناد و همکاران [2]شبکه‌ای را معرفی می‌کنند که از یک پهپاد و تعدادی کاربر تشکیل شده‌است. در این شبکه هدف حداکثرکردن تعداد کاربران تحت پوشش پهپاد و حداقل کردن قدرت انتقال[7] پهپاد می‌باشد. جینگکونگ سان و کریستوس ماسوروس[3]، مکان یابی مناسب تعدادی ایستگاه پایه هوایی را مطرح می کنند، به نحوی که در یک ناحیه مشخص‌شده حداکثر تعداد کاربران را پوشش بدهند .همانطور که یانچنگ چن و همکارانش[4] بیان کرده‌اند،به علت ثابت بودن ایستگاه پایه زمینی، این ایستگاه توانایی فراهم‌کردن پوشش مناسب برای کاربران خود را ندارد. بنابراین پهپادها به عنوان ایستگاه‌های پایه هوایی عمل می‌کنند و نحوه مکان‌یابی آنها به گونه‌ای است که بتوانند حداکثر تعداد کاربران را پوشش دهند و همچنین حداقل انرژی را مصرف کنند.

همیشه در مکان‌یابی بهینه پهپادها، هدف حداکثرکردن پوشش کاربران نیست. پهپاد می‌تواند به عنوان رله[8] در شبکه ارتباطی فعالیت کند. امید اسرافیلیان و همکاران[5]، مساله مکان‌یابی سه بعدی پهپاد را مطرح می‌کنند، که پهپاد به عنوان یک رله بین کاربران و ایستگاه پایه زمینی در حال فعالیت است. هم‌چنین جونتینگ چن و دیوید گسبرت [6]بهینه‌سازی مکان پهپاد که از طریق استراتژی رمزگشایی و ارسال، پیام‌هایی را از ایستگاه پایه به کاربر ارسال می‌کند را بررسی کرده‌اند .

زهرا رحیمی و همکاران[7] در مقاله خود به ارائه یک مدل ریاضی برای مکان‌یابی سه بعدی پهپادها و حل دقیق آن پرداخته‌اند. ابتدا با استفاده از الگوریتم ادغام سلول‌ها[9] نقاط کاندید برای استقرار پهپادها را به‌دست آورده‌اند. سپس مدل خود را به وسیله یک الگوریتم تکراری حل کرده‌اند تا تعداد مناسب پهپادها و مکان مناسب برای استقرار آن‌ها(از بین نقاط کاندید) مشخص شود.

1-1 بیان مساله

در این مقاله فرض شده‌است موقعیت تعدادی کاربر در یک بازه‌ی زمانی کوتاه به ما داده‌شده‌است. این کاربران در بازه‌ی زمانی مورد نظر ما جابه‌جایی قابل ملاحظه‌ای ندارند. به دنبال این هستیم که با استفاده از تعدادی ایستگاه پایه سوار بر پهپاد به بهترشدن عملکرد شبکه کمک کنیم. تعداد پهپادها در این مساله از اهمیت زیادی برخوردار است. با افزایش تعداد پهپادها، تعداد کاربران بیشتری تحت پوشش شبکه قرار می‌گیرند و کیفیت ارتباط نیز بهتر خواهد بود. اما از طرف دیگر افزایش تعداد پهپادها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست و هزینه قابل توجهی را به همراه خواهد داشت. بنابراین ما به دنبال پیداکردن کمترین تعداد ممکن از پهپادها در مکان‌های مناسب هستیم تا بتوانیم درصد مشخصی از کاربران(حداقل آلفا درصد) را پوشش بدهیم.

در پژوهش [7] بر خلاف پژوهش‌های قبلی، پوشش کاربران و نرخ داده مورد انتظار آن‌ها با هم در نظر گرفته‌شده‌است، که در این پژوهش هم به طور مشابه این محدودیت‌ها را در نظر گرفته‌ایم. اما مدل [7] طی یک الگوریتم تکراری تعداد پهپادها را تعیین می‌کند. در صورتی که مدل ارائه‌شده در این پژوهش با درنظرگرفتن حداقل‌کردن تعداد پهپادها در تابع هدف و طی یک مرحله به جواب می‌رسد که باعث کاهش قابل توجه زمان حل مدل می‌شود.

---

[5] Low altitude UAV
[6] Hot spot
[7] Transmit power
[8] Relay
[9] Merge cell

3-مدل پیشنهادی و روش حل

همان‌طور که قبلا به آن اشاره کردیم، ما برای پیداکردن کمترین تعداد پهپاد و بهترین نقاط استقرار از بین نقاط کاندید که طبق الگوریتم مرج سل مقاله [7] به‌دست می‌آید یک مدل ریاضی ارائه کرده‌ایم. بنابراین لازم است که ابتدا پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل ریاضی را معرفی کنیم.

جدول 1 پارامترها و جدول 2 متغیرهای تصمیم استفاده شده در مدل را نشان می‌دهد.

جدول 1: پارامترهای استفاده‌شده

تعریف	پارامتر
فرکانس حامل	f_c
سرعت نور	C
مجموعه نقاط کاندید	I
مجموعه کاربران	J
نرخ داده پهپاد	β
تعداد کاربران	U
مینیمم درصد پوشش خواسته‌شده	α
مینیمم ارتفاع مجاز	H_{min}
ماکزیمم ارتفاع مجاز	H_{max}
زاویه پوشش پهپاد	θ
مجموعه کانال‌های در دسترس	P
ماکزیمم هدررفتگی مجاز در شبکه	PL_{max}
یک عدد بزرگ	M

جدول 2: متغیرهای تصمیم

تعریف	متغیر تصمیم
1 اگر کاربر j توسط نقطه کاندید i پوشش داده شود. 0 در غیر این صورت.	x_{ij}
1 اگر نقطه کاندید i برای قرارگیری پهپاد انتخاب شده باشد. 0 در غیر این صورت.	mb_i
ارتفاع پهپادی که در نقطه کاندید i قرارگرفته است.	h_i
هدررفتگی در طول مسیر بین کاربر j و نقطه کاندید i اگر کاربر j توسط نقطه کاندید i پوشش داده شود. 0 در غیر این صورت	k_{ij}
متغیر تصمیم کمکی	t_{ij}

در ادامه به ارائه مدل پیشنهادی و توضیح تابع هدف و محدودیت‌ها می‌پردازیم.

$$min \sum_{i\in I} \frac{c_i}{c_{max}} mb_i + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} \frac{k_{ij}}{PL_{max}} \quad (1)$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} \le 1 \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$x_{ij} \le mb_i \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} x_{ij} \ge \alpha \times U \quad (4)$$

$$\sum_{j\in J} D_j \times x_{ij} \le \beta \times mb_i \qquad \forall i \in I \quad (5)$$

$$h_i \le H_{max} \times mb_i \qquad \forall i \in I \quad (6)$$

$$h_i \ge H_{min} \times mb_i \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$\cot\theta \times x_{ij} \le \frac{h_i}{d_{ij}} \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (8)$$

$$(4\pi\frac{\mathrm{fc}}{c})^2(d_{ij}^2+h_i^2) \le PL_{max} + (1 - x_{ij})M \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (9)$$

$$k_{ij} \le M x_{ij} \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (10)$$

$$k_{ij} \ge 4\pi\frac{\mathrm{fc}}{c}(d_{ij}^2 + h_i^2)x_{ij} \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (11)$$

تابع هدف مساله(1) به صورت حداقل کردن مجموع انرژی مصرفی پهپادها و حداقل کردن مجموع هدررفتگی در طول مسیر[10] تعریف می‌شود.طبق محدودیت (2) هر کاربر فقط از یک پهپاد می‌تواند سرویس بگیرد.محدودیت(3) بیان می کند که کاربر j فقط درصورتی می‌تواند از نقطه کاندید i سرویس بگیرد،که نقطه i به عنوان یکی از مکان های قرارگیری پهپاد انتخاب شود.محدودیت (4) ضمانت می‌کند که حداقل آلفا درصد از کاربران پوشش داده می‌شوند. محدودیت (5) به هر پهپاد اجازه می‌دهد که با بیشترین نرخ داده‌ای که می‌تواند، کاربران را پوشش دهد.(β) محدودیت (6) و (7) بیان می‌کنند که اگر یک نقطه کاندید برای قرارگیری پهپاد انتخاب شده‌باشد، ارتفاع پهپاد باید در محدوده مجاز مشخص‌شده باشد. هم چنین ارتفاع پهپاد در این نقطه مساوی صفر خواهد بود، اگر و فقط اگر، این نقطه کاندید برای قرارگرفتن پهپاد انتخاب نشده‌باشد. در محدودیت (8) می‌خواهیم تخصیص کاربرانی که در ناحیه پوشش پهپاد قرار ندارند را به آن پهپاد ممنوع کنیم.در محدودیت (9) هدف ما این است که کاربر j به پهپاد i تخصیص نیابد، در صورتی که PL(هدررفتگی در طول مسیر) از PL_{max} بیشتر شود.محدودیت **(10)** بیان می دارد درصورتی که کاربر j به پهپاد i تخصیص نیابد، مقدار $\mathbf{k_{ij}}$ مساوی صفر باشد. محدودیت **(11)** می گوید اگر کاربر j از پهپادی که در نقطه کاندید i قرار گرفته سرویس بگیرد، مقدار $\mathbf{k_{ij}}$ حداقل باید برابر با PL این کاربر از پهپاد باشد. چون تابع هدف مساله مینیمم کردن مجموع $\mathbf{k_{ij}}$ ها است، مقدار $\mathbf{k_{ij}}$ از سمت راست نامساوی بیشتر نخواهد شد.

1.3-نتایج عددی

پس از مدل‌سازی ریاضی مساله، ما تعداد 30 نمونه شبیه‌سازی شده مختلف که در همه‌ی آن‌ها تعداد کاربران 700 و مقدار آلفا مساوی 0.9 در نظرگرفته‌شده‌است را تولید کردیم. لازم به ذکر است که چگالی توزیع کاربران به سه صورت متراکم[11]، تراکم

[10] Pathloss
[11] Dense

متوسط[12] و پراکنده[13] می‌باشد که برای هر کدام ده نمونه مختلف تولید شده‌است. سپس مدل پیشنهادی و مدل ارائه‌شده در [7]به‌وسیله حل‌کننده CPLEX Studio IDE روی یک سیستم با 8GB RAM و 2.6 GHZ Core(TM) i7-3720QM CPUاجرا شده‌است. در ادامه به مقایسه نتایج این دو مدل می‌پردازیم.

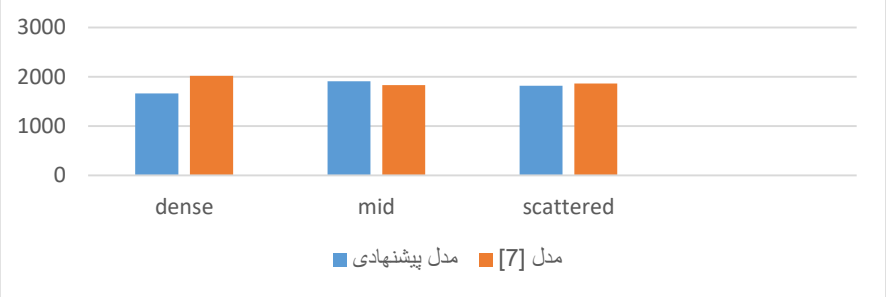
جدول 3: پارامترهای آزمون برای ارزیابی مدل

پارامتر	توصیف
ناحیه	500*500 m
U	700
α	0.9
β	300 Mbps
H_{min}	10 m
H_{max}	50 m

شکل 1 نرخ داده کاربران در هر سه حالت را برای دو مدل نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشخص است، در مدل پیشنهادی ما در حالت متراکم و پراکنده نرخ داده کمتر، اما در حالت تراکم متوسط بیشتر است.

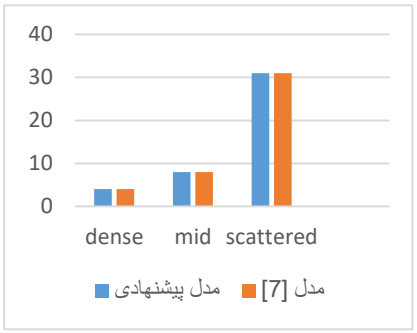
شکل2 به مقایسه حداقل تعداد پهپادها در دو مدل می‌پردازد. تعداد نقاط کاندید در حالت متراکم 24، تراکم متوسط 70 و پراکنده 146 می‌باشد. تعداد مناسب پهپادها در هر دو مدل یکسان به‌دست می‌آید. به طور میانگین در حالت متراکم 4 پهپاد، در حالت تراکم متوسط 8 پهپاد و در حالت پراکنده 31 پهپاد مناسب خواهد بود. در نتیجه هر چه تراکم کاربران کمتر باشد، تعداد پهپادهای مورد نیاز برای پوشش 90 درصدی کاربران بیشتر خواهد بود.

شکل 3 زمان حل دو مدل را در هر سه حالت تراکم کاربران مقایسه می‌کند. ملاحظه می‌شود که مدل پیشنهادی ما در زمان کمتری به جواب می‌رسد.

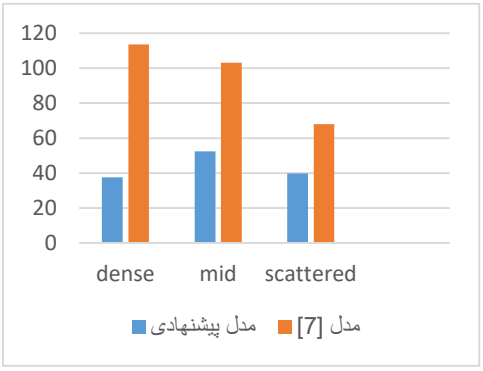


شکل 1: مقایسه نرخ داده کاربران در دو مدل

[12] Mid
[13] Scattered



شکل 2: مقایسه حداقل تعداد پهپادها



شکل 3: مقایسه زمان حل

4-نتیجه

در این مقاله یک مدل ریاضی برای مکان‌یابی سه بعدی پهپادها به منظور پوشش حداقل آلفا درصد از کاربران و تعیین حداقل تعداد مناسب پهپادها ارائه شده‌است. یکی از نقاط مثبت مدل پیشنهادی ما مشخص‌کردن بهترین ارتفاع برای پهپادها و پیداکردن همزمان تعداد بهینه پهپاد و نقاط استقرار مناسب آن‌ها می‌باشد. برای حل مدل ابتدا به تعدادی نقاط کاندید نیاز است تا مکان مناسب پهپادها از بین نقاط کاندید انتخاب شود. ممکن است بین کانال‌های ارتباطی برخی از پهپادها تداخل به وجود بیاید. در نظرگرفتن تداخل و کنترل آن، از موارد مهمی است که می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار گیرد.

5-مراجع

[1] Galkin, B., Kibiłda, J., & DaSilva, L. A., “A stochastic model for UAV networks positioned above demand hotspots in urban environments”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *68*(7), 6985-6996,2019.

[2] Alzenad, M., El-Keyi, A., Lagum, F., & Yanikomeroglu, H.,” 3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage”, *IEEE Wireless Communications Letters*, *6*(4), 434-437,2017.

[3] Sun, J., & Masouros, C.” Drone positioning for user coverage maximization”, In *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (pp. 318-322),2018.

[4] Chen, Y., Li, N., Wang, C., Xie, W., & Xv, J.,” A 3D placement of unmanned aerial vehicle base station based on multi-population genetic algorithm for maximizing users with different QoS requirements”, In *2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT)* (pp. 967-972),2018.

[5] Esrafilian, O., Gangula, R., & Gesbert, D.,” UAV-relay placement with unknown user locations and channel parameters”, In *2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers* (pp. 1075-1079). IEEE, 2018.

[6] Chen, J., & Gesbert, D.,” Optimal positioning of flying relays for wireless networks: A LOS map approach*”,* In 2017 IEEE international conference on communications *(ICC)* (pp. 1-6). IEEE.,2017.

[7] Rahimi, Z., Sobouti, M. J., Ghanbari, R., Seno, S. A. H., Mohajerzadeh, A. H., Ahmadi, H., & Yanikomeroglu, H.,” An Efficient 3D Positioning Approach to Minimize Required UAVs for IoT Network Coverage”, *IEEE Internet of Things Journal*,2021.