Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 17, No. 02, 2026
pp. 45-62

Performance Analysis of Data Offloading in UAV-Assisted Cellular Networks Considering UAV Energy Constraints

Fereidoun H. Panahi, Farzad H. Panahi, Sirvan Moradi Argeneh, and Navid Karami
Department of Electronics and Communication Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Abstract:
With the rapid growth in the use of smart devices, wireless networks are expanding and evolving at an unprecedented pace. This growth has led to a significant increase in cellular data traffic, which in turn has raised network energy consumption and infrastructure demands. To address these challenges, the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) as aerial base stations (ABSs) to assist cellular networks and offload data traffic from terrestrial base stations (TBSs) has emerged as a major advancement in network development. Although extensive research has been conducted on the design and performance evaluation of UAV-assisted cellular networks, the instability and uncertainty of UAV availability—due to their dependence on charging stations—remain a critical research gap. In other words, unlike previous studies, this work explicitly defines and calculates the UAV availability probability, presenting a more realistic modeling of UAV energy constraints and their need to revisit distributed charging stations. Furthermore, we evaluate the impact of this modeling on the success rate of cellular traffic offloading, considering other flight-related factors that affect the quality of service (QoS) provided to ground and aerial users, as well as the inherent interference between communication links. Using a comprehensive model based on the Poisson Point Process (PPP), the study investigates these factors and their combined effects. Simulation results demonstrate that UAV deployment can effectively reduce data traffic in central and highly congested network areas, while providing a more accurate representation of network performance under UAV energy limitations.

Keywords: Cellular Networks, UAV, Aerial Base Station, Terrestrial Base Station, Charging Station, Data Offloading, Energy Constraint.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
https://doi.org/10.22108/isee.2026.146873.1771

مقاله پژوهشی

تحلیل عملکرد کاهش بار داده در شبکه‌های سلولی مبتنی بر پهپاد با در نظر گرفتن محدودیت انرژی پهپاد

فریدون حسین‌پناهی [*۱]، فرزاد حسین‌پناهی [۲]، سیروان مرادی ارگنه [۳]، نوید کرمی [۴]

۱- استادیار گروه مهندسی برق (الکترونیک و مخابرات)، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، ایران
fereidoun.h.panahi@uok.ac.ir

۲- دانشیار گروه مهندسی برق (الکترونیک و مخابرات)، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، ایران
farzad.h.panahi@uok.ac.ir

۳- پژوهشگر گروه مهندسی برق (الکترونیک و مخابرات)، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، ایران
s.moradiargeneh@uok.ac.ir

۴- پژوهشگر گروه مهندسی برق (الکترونیک و مخابرات)، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، ایران
navid.karami@uok.ac.ir

چکیده: با رشد گستردهٔ استفاده از دستگاه‌های هوشمند، شبکه‌های بی‌سیم در حال توسعه و گسترش بیشتری هستند. این رشد به افزایش چشمگیر ترافیک داده‌های سلولی منجر شده است و در نتیجه، مصرف انرژی و نیازمندی‌های زیرساخت‌های شبکه نیز افزایش یافته‌اند. به منظور پاسخ‌گویی به این نیازها، استفاده از هواپیمای بدون سرنشین (پهپاد) به عنوان ایستگاه پایهٔ هوایی (ABS) برای کمک به شبکه‌های سلولی و کاهش بار داده در ایستگاه پایهٔ زمینی (TBS) به عنوان یک جهش مهم در توسعهٔ این شبکه¬ها مطرح شده است. اگرچه پژوهش‌هایی گسترده بر روی طراحی و ارزیابی عملکرد شبکه‌های سلولی مبتنی بر پهپاد انجام شده‌اند، همچنان مسئلهٔ ناپایداری و عدم قطعیت حضور پهپادهای وابسته به ایستگاه‌های شارژ به عنوان ایستگاه‌های پایه در شبکه‌های سلولی به صورت یک خلأ اساسی در این پژوهش‌ها قابل شناسایی است. به عبارت دیگر، در این پژوهش، برخلاف مطالعات قبلی، با تعریف و محاسبهٔ احتمال در دسترس بودن پهپاد، مدل مسئلهٔ محدودیت انرژی و نیاز به مراجعهٔ آن به ایستگاه‌های شارژ توزیع‌شده به شکلی واقع‌گرایانه‌تر مطرح شده است. همچنین، تأثیر این رویکرد بر موفقیت فرایند کاهش بار ترافیکی شبکهٔ سلولی ـ با در نظر گرفتن سایر عوامل پروازی مؤثر بر کیفیت سرویس ارائه‌شده به کاربران زمینی و هوایی و نیز تداخل ذاتی میان لینک‌های ارتباطی ـ در قالب یک مدل جامع مبتنی بر فرایند نقطه‌ای پواسون ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد استقرار پهپادها می‌تواند به طور مؤثر حجم داده‌ها را در نقاط پرترافیک شبکه کاهش و تصویری دقیق‌تر از عملکرد شبکه با فرض محدودیت انرژی پهپاد ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های سلولی، پهپاد، ایستگاه پایهٔ هوایی، ایستگاه پایهٔ زمینی، ایستگاه شارژ، کاهش بار داده، محدودیت انرژی.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، شاهد رشد سریع استفاده از پهپاد (UAV)[1] در کاربردهایی مختلف مانند نظامی، کشاورزی، حمل‌ونقل و به ویژه در ارتباطات بی‌سیم بوده‌ایم. پهپادها به دلیل قابلیت‌هایی منحصربه‌فرد همچون قابلیت پرواز در ارتفاعات بالا، تحرک‌پذیری و انعطاف‌پذیری در موقعیت‌یابی، به عنوان یک راه‌حل نوین برای ارائهٔ خدمات ارتباطی مورد توجه قرار گرفته‌اند. با افزایش نیاز به پوشش سلولی در مناطق

[1] تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۸/۰۳
نام نویسنده مسئول: فریدون حسین‌پناهی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، کردستان، دانشگاه کردستان، گروه مهندسی برق (الکترونیک و مخابرات)

دورافتاده و یا در شرایط اضطراری که زیرساخت‌های زمینی قابل دسترسی یا قابل اعتماد نیستند، استفاده از پهپادها به عنوان ایستگاه‌های پایهٔ پروازی (FBSs)[۲] به یک راهکار جذاب تبدیل شده است [۱-۵]. پهپادها با توانایی حرکت آزادانه و انعطاف‌پذیری در تغییر مکان، می‌توانند به طور مؤثر به پوشش شبکه‌های سلولی کمک کنند. این دستگاه‌ها قادر هستند در ارتفاعات بالاتری نسبت به ایستگاه‌های پایهٔ زمینی (TBSs)[۳] قرار گیرند و به این ترتیب، احتمال ایجاد لینک خط دید مستقیم (LoS)[٤] با کاربران زمینی را افزایش دهند [۲]. این ویژگی می‌تواند به بهبود کیفیت سیگنال، کاهش تداخل و افزایش ظرفیت شبکه کمک کند. این امر به ویژه در مناطقی که با موانع فیزیکی متعدد مانند ساختمان‌ها، درختان یا زمین‌های ناهموار مواجه هستند، بسیار مهم است. با این حال، امکان‌سنجی شبکه‌های سلولی مبتنی بر پهپاد همچنان با چالش‌هایی اساسی مواجه است. بیشتر مطالعات پیشین پرواز پهپاد را پایدار و مکان کاربر را ثابت فرض کرده‌اند. با این حال، پهپادها معمولاً خطاهای تخمین کانال و انتقال ناپایدار را تجربه می‌کنند که نباید به دلیل لرزش‌های اجتناب‌ناپذیر ناشی از جریان هوا و ارتعاش نادیده گرفته شوند [۳]. همچنین، به طور کلی، کاربرد پهپادها توسط برخی از آسیب‌پذیری‌های امنیتی با محدودیت روبه‌رو است؛ زیرا به‌راحتی با اسکن بصری یا راداری قابل شناسایی و در نتیجه، مستعد حملات پارازیتی هستند. بنابراین، پژوهش دربارهٔ فناوری‌های انتقال ایمن برای افزایش امنیت سیستم ارتباطی پهپاد مورد نیاز است [٤]. به عنوان یک چالش دیگر، می‌توان به ظرفیت حمل بار محدود در پهپادها اشاره کرد. به این ترتیب، نصب برخی از ماژول‌های مکانیکی و مخابراتی سنگین و حجیم بر روی پهپاد چالش‌هایی زیادی را ایجاد می‌کند. با وجود این، چالش اصلی پهپادهای مخابراتی محدودیت انرژی و باتری پهپادهاست که به زمان پرواز محدود منجر می‌شود. این مسئله پهپاد را مجبور می‌کند تا به طور منظم عملیات خود را به عنوان یک ایستگاه پایهٔ هوایی (ABS)[۵] متوقف کند تا به ایستگاه شارژ برگردد و باتری خود را شارژ یا تعویض کند. در حین شارژ، کاربران در منطقهٔ تحت پوشش پهپاد باید به منابع در دسترس دیگری در شبکهٔ سلولی مانند ایستگاه‌های پایهٔ زمینی متکی باشند [۵].

بنابراین، با در نظر گرفتن مجموعهٔ این محدودیت‌ها، می‌توان گفت فقط تجهیزات ارتباطی سبک و کوچک با قابلیت پشتیبانی از پروتکل‌های ارتباطی امن و پرسرعت بر روی پهپادها قابل نصب است. این موضوع ممکن است بر کارایی و حتی طراحی مسیر پروازی پهپادها در ارائهٔ خدمات ارتباطی تأثیر بگذارد؛ زیرا نصب تجهیزات پیشرفته‌تر و با قابلیت‌های بیشتر نیازمند افزایش وزن و لندازهٔ پهپاد است که خود به مصرف انرژی بیشتر و کاهش زمان پرواز منجر می‌شود [٦]. از این رو، توسعهٔ تجهیزات ارتباطی کوچک‌تر و سبک‌تر با کارایی زیاد از الزامات کلیدی برای بهینه‌سازی استفاده از پهپادها به عنوان ایستگاه‌های پایه است. کنترل و مدیریت تعدادی زیاد پهپاد که به عنوان ایستگاه‌های پایه در مناطق مختلف فعالیت می‌کنند نیز چالشی پیچیده است. این مدیریت شامل هماهنگی پهپادها برای جلوگیری از برخورد با یکدیگر و موانع فیزیکی، تنظیم مسیرهای پروازی بهینه، جلوگیری از تداخلات فرکانسی و تضمین پوشش بهینهٔ شبکه می‌شود. علاوه بر این، نیاز به سیستم‌های کنترلی پیشرفته برای هدایت و نظارت بر پهپادها وجود دارد که بتوانند به صورت خودکار تصمیم‌گیری کنند و در شرایط اضطراری یا نقص فنی، پاسخ مناسب ارائه دهند [۷]. بنابراین، طراحی و ارزیابی عملکرد یک شبکهٔ سلولی مبتنی بر پهپاد برای دست‌یابی به یک ساختار ارتباطی کارآمد و قابل اعتماد ضروری است. در این پژوهش، بدون از دست دادن جامعیت موضوع، استقرار یک پهپاد به عنوان یک ایستگاه پایهٔ هوایی برای ارائهٔ خدمات به کاربران توزیع‌شده در یک منطقهٔ جغرافیایی خاص تجزیه‌وتحلیل می‌شود.

در ادامه، مطالعات پیشین در زمینهٔ نقش پهپادها در کاهش بار داده در شبکه‌های سلولی را بررسی خواهیم کرد. سپس، با تمرکز بر مسئلهٔ محدودیت انرژی پهپاد، اهداف و نوآوری‌های این پژوهش نیز در مقایسه با سایر پژوهش‌ها بیان خواهند شد. در بخش دوم نیز، یک مدل پایه برای تحلیل عملکرد فرایند کاهش بار داده در شبکه‌های سلولی مبتنی بر پهپاد با در نظر گرفتن فاکتور عدم قطعیت حضور پهپاد ارائه می‌شود. محاسبات مربوط به نرخ کاربران متصل به ایستگاه زمینی و پهپاد با فرض عدم قطعیت حضور پهپاد به دلیل محدودیت انرژی نیز در بخش سوم انجام می‌شود. در بخش چهارم، ضمن

شبیه‌سازی شبکه‌های سلولی مبتنی بر پهپاد، نتایج کاهش بار داده و عملکرد سیستم پیشنهادی را تحلیل خواهیم کرد. در بخش پنجم نیز، جمع‌بندی نتایج مقاله با بیان چالش‌ها و اهداف پیش رو در این حوزه صورت خواهد گرفت.

۱-۱- پیشینهٔ پژوهش

امروزه، در شبکه‌های سلولی نسل جدید، تعداد کاربران شبکه‌های سلولی هر روز افزایش می‌یابد و در نتیجه، شبکه‌های سلولی مبتنی بر **TBS** به‌تنهایی توانایی پردازش یا انتقال تمام بار ترافیک داده را نخواهند داشت. به این ترتیب، موضوع کاهش بار داده یا آفلودینگ داده[۶] از اهمیت زیادی برخوردار است که به کمک طرح‌های مختلف مدیریت بار ترافیکی در شبکهٔ سلولی قابل اجراست [۶-۱۰]. یکی از این طرح‌ها، اضافه‌کردن ایستگاه‌های کوچک سلولی[۷] یا **SBS**ها به شبکه است. این ایستگاه‌ها دارای شعاع پوشش سلولی کوچک‌تر هستند و همچنین، توان ارسالی کمتری نسبت به **TBS**ها دارند. در نتیجه، زمانی که به شبکهٔ سلولی اضافه می‌شوند، قادر خواهند بود بخشی از کاربران را پوشش دهند و در نتیجه، بار ترافیکی ایستگاه پایهٔ زمینی اصلی، یعنی **TBS**، کمتر می‌شود، تا جایی که امروزه **SBS**ها در مناطق پرجمعیت شهری و محیط‌های داخلی به یک فناوری اجتناب‌ناپذیر برای ارائهٔ پوشش شبکه تبدیل شده‌اند [۶]. با این راهکار، آنتن‌های سلول کوچک می‌توانند روی ساختمان‌ها، چراغ‌های خیابان و سایر زیرساخت‌ها نصب شوند و پوشش و ظرفیت را در مکان‌هایی که کاربران زیادی دارند، بهبود دهند [۷، ۸]. به طور کلی، **SBS**ها بر اساس محدودهٔ پوشش خود به انواعی مختلف از جمله فمتوسل، پیکوسل و میکروسل تقسیم می‌شوند [۹]. روشی دیگر نیز که مورد توجه مراکز پژوهشی قرار گرفته است، استفاده از فناوری ارتباط دستگاه به دستگاه[۸] یا **D2D** است. به این ترتیب، ارتباط مستقیم بین دو کاربر موبایل بدون عبور از ایستگاه پایهٔ سلولی یا شبکهٔ مرکزی تعریف می‌شود. در واقع، وقتی دو کاربر با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند، بدون ارجاع ترافیک داده به **TBS** بخشی از داده مورد نیاز خود را مستقیماً از یکدیگر دریافت می‌کنند و در نتیجه، بسته به تراکم لینک‌های **D2D** برقرارشده، حجمی قابل ملاحظه از ترافیک مرکزی شبکهٔ سلولی برداشته می‌شود [۱۰].

در سال‌های اخیر، نقش پهپادها نیز در کاهش ترافیک شبکهٔ سلولی، به دلیل سرعت عمل و انعطاف‌پذیری زیاد در ایجاد لینک‌های مخابراتی، مورد توجه بسیاری از پژوهش‌ها قرار گرفته است. در این مدل، پهپادها در نقش یک ایستگاه پایهٔ کمکی عمل و با پوشش کاربران و به ویژه کاربران نزدیک به لبهٔ شبکهٔ سلولی، به کاهش بار ترافیکی **TBS**ها کمک می‌کنند؛ هرچند موانع و مسائل چالش‌برانگیز زیادی در شبکه‌های مخابراتی مبتنی بر پهپاد وجود دارند که سبب می‌شوند پهپادها به عنوان ایستگاه‌های پایه همواره در دسترس نباشند. بحث محدودیت انرژی پهپادها یک از مهم‌ترین این چالش‌هاست که به‌هیچ‌وجه قابل چشم‌پوشی نیست و تاکنون راه‌حل‌هایی مختلف پیشنهاد شده‌اند [۱۱-۱۸]. یکی از راه‌حل‌های معمول، تعویض آنی پهپادهاست که در آن، به‌محض اینکه باتری یک پهپاد تخلیه می‌شود، پهپادی دیگر با باتری کامل جایگزین آن می‌شود [۱۱]. این روش به کاهش وقفه‌های ناشی از بازگشت پهپاد برای شارژ مجدد کمک می‌کند و می‌تواند به طور مؤثر زمان پوشش پیوسته را افزایش دهد، اما واضح است که مستلزم هزینهٔ بیشتری است. راه‌حل دیگر تعویض باتری به جای شارژ مجدد است. در این روش، پهپاد به ایستگاه شارژ برمی‌گردد تا باتری تخلیه‌شدهٔ خود را با یک باتری کاملاً شارژشده تعویض کند [۱۲، ۱۵]. این روش می‌تواند به کاهش زمان توقف برای شارژ مجدد و افزایش زمان پرواز کمک کند. تعویض سریع باتری به پهپاد امکان می‌دهد تا در زمانی کوتاه‌تر به عملیات خود بازگردد و پوشش شبکه را بدون وقفه فراهم کند. شارژ بی‌سیم مبتنی بر لیزر نیز یکی دیگر از راه‌حل‌های نوآورانه است. در این رویکرد، پرتوهای لیزر به صورت بی‌سیم برای شارژ باتری پهپادها استفاده می‌شوند. این روش می‌تواند به پهپادها امکان دهد تا بدون نیاز به فرود و اتصال به منبع تغذیه، در حین پرواز شارژ شوند [۱۳]. استفاده از سیستم‌های شارژ بی‌سیم نه فقط زمان پرواز را افزایش می‌دهد، بلکه به حفظ انعطاف‌پذیری و تحرک پهپاد نیز کمک می‌کند. یکی دیگر از رویکردهای مطرح‌شده

استفاده از پهپادهای متصل به کابل است که به آنها امکان دسترسی به منبع تغذیهٔ پایدار را می‌دهد. اگرچه این روش تحرک پهپاد را محدود می‌کند، می‌تواند به طور مداوم برق پهپاد را تأمین کند و زمان عملیاتی آن را افزایش دهد [۱۶]. این رویکرد می‌تواند به ویژه در کاربردهایی مفید باشد که نیاز به پوشش ثابت و بلندمدت دارند.

اگرچه به‌تازگی پژوهش‌هایی گسترده بر روی طراحی و ارزیابی عملکرد شبکه‌های سلولی و اینترنت اشیا (IoT) مبتنی بر پهپاد انجام شده‌اند [۱۹-۲۴]، همچنان مسئلهٔ ناپایداری و عدم قطعیت حضور پهپادهای وابسته به ایستگاه‌های شارژ به عنوان ایستگاه‌های پایه در شبکه‌های سلولی به صورت یک خلأ اساسی در این پژوهش‌ها قابل شناسایی است. به عبارت دیگر، در این پژوهش، برخلاف مطالعات قبلی، با تعریف و محاسبهٔ احتمال در دسترس بودن پهپاد، نه فقط مسئلهٔ محدودیت انرژی پهپاد به صورت واقع‌گرایانه‌تر مطرح شده است، بلکه تأثیرات این رویکرد بر میزان موفقیت فرایند کاهش بار ترافیکی شبکهٔ سلولی با در نظر گرفتن سایر فاکتورهای پروازی مؤثر بر کیفیت سرویس ارائه‌شده به کاربران زمینی و هوایی و تداخل ذاتی بین لینک‌های ارتباطی به صورت جامع در یک مدل مبتنی بر فرایند نقطه‌ای پواسون ارزیابی شده است. این پژوهش می‌تواند زمینه‌ای مناسب برای توسعهٔ راهکارهای واقع‌گرایانه در بهبود کیفیت خدمات شبکه‌های بی‌سیم مبتنی بر پهپاد باشد.

۱-۲- اهداف و نوآوری‌های پژوهش

در مجموع، بر اساس توضیحات پیشین، اهداف پژوهش و نوآوری‌های انجام‌شده در موارد زیر قابل جمع‌بندی است:

- مدل‌سازی پهپاد به عنوان ایستگاه پایهٔ هوایی یا **ABS**: در این مدل، از یک پهپاد با الگوی پروازی منظم برای انجام فرایند شارژ، به عنوان یک ایستگاه پایهٔ هوایی در کنار یک ایستگاه پایهٔ زمینی یا **TBS** با هدف کاهش بار داده در تعامل با کاربران زمینی با توزیع یکنواخت استفاده شده است. به این ترتیب، تأثیر محدودیت انرژی پهپاد، چگالی ایستگاه‌های شارژ و زمان شارژ یا تعویض بر فرایند کاهش بار داده در شبکهٔ سلولی قابل بررسی است.
- تعریف و محاسبهٔ احتمال در دسترس بودن پهپاد: در این پژوهش، مسئلهٔ ناپایداری و عدم قطعیت در حضور پهپادهای وابسته به ایستگاه‌های شارژ در طی فرایند پروازی رفت‌وبرگشت به صورت احتمال در دسترس بودن پهپاد تعریف و فرموله شده است. به این ترتیب، نه فقط مسئلهٔ محدودیت انرژی پهپاد به صورت واقع‌گرایانه‌تر مطرح شده است، بلکه تأثیرات این رویکرد بر میزان موفقیت فرایند کاهش بار ترافیکی شبکهٔ سلولی با در نظر گرفتن سایر فاکتورهای پروازی مؤثر بر کیفیت سرویس ارائه‌شده به کاربران زمینی و هوایی به صورت جامع در یک مدل مبتنی بر فرایند نقطه‌ای پواسون ارزیابی شده است.
- محاسبات مجموع نرخ کاربران متصل به ایستگاه‌های پایهٔ **ABS** و **TBS** و تحلیل اثر فاکتورهای پروازی ارتفاع و توان پهپاد: در تحلیل‌های ارائه‌شده مبتنی بر ابزارهای هندسهٔ تصادفی، تأثیرات در دسترس نبودن پهپاد بر نرخ دادهٔ کاربران هوایی و زمینی با در نظر گرفتن فاکتورهای پروازی پهپاد به صورت روابط ریاضی تحلیل و شبیه‌سازی شده است.

برای تسهیل در دسترسی به معانی واژگان، مجموعه واژگان اختصاری به همراه تعاریف آنها در جدول (۱) آمده است.

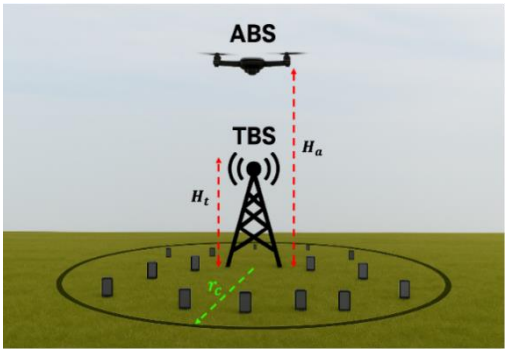
جدول (۱): فهرست اختصارات و تعاریف واژگان

واژه	تعریف
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
D2D	Device-to-Device
IoT	Internet of Things
LoS	Line of Sight
SBS	Small-cell Base Station
TBS	Terrestrial Base Station
FDMA	Frequency Division Multiple Access
BS	Base Station
NLoS	Non-Line of Sight
ABS	Aerial Base Station
AU	Aerial User
TU	Terrestrial User

۲- مدل سیستم

در این بخش، یک مدل پایه برای تحلیل عملکرد فرایند

کاهش بار داده در شبکه‌های سلولی مبتنی بر پهپاد با در نظر گرفتن فاکتور عدم قطعیت حضور پهپاد ارائه می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، اجرای شبکه‌های سلولی مبتنی بر پهپادها به عنوان ایستگاه‌های پایهٔ هوایی با چالش‌های زیادی مواجه است. در این میان، محدودیت منابع انرژی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده در زمان پرواز پهپاد محسوب می‌شود. این مسئلهٔ پهپاد را مجبور می‌کند تا به طور منظم عملکرد خود را به عنوان یک ایستگاه پایهٔ هوایی قطع کند تا به ایستگاه شارژ برگردد و باتری خود را شارژ یا با یک باتری جدید جایگزین کند. در طی فرایند شارژ، کاربران در منطقهٔ پوشش پهپاد برای خدمات سلولی به منابعی دیگر مانند ایستگاه‌های پایهٔ زمینی نزدیک وابسته هستند. در اینجا، مطابق شکل (۱)، یک مدل پایه برای شبکهٔ سلولی مبتنی بر پهپاد در نظر گرفته می‌شود که در آن، یک پهپاد به عنوان یک ایستگاه پایهٔ هوایی یا ABS برای کمک به ایستگاه پایهٔ زمینی یا TBS از طریق کاهش بار دادهٔ کاربران تحت پوشش عمل می‌کند. با در نظر گرفتن آنتن‌های همه‌جهته، یک ایستگاه TBS قادر است به کاربران زیادی در یک سلول دایره‌ای به شعاع r_c و مساحت $A_c = \pi r_c^2$ در یک منطقهٔ مشخص خدمات‌رسانی کند. فرض می‌شود کاربران به طور یکنواخت در سلول با چگالی ρ توزیع شده‌اند. بنابراین، میانگین تعداد کل کاربران در هر سلول به صورت $M = \rho A_c = \rho\pi r_c^2$ قابل محاسبه است. همچنین، فرض می‌شود اپراتور شبکه از مکان دقیق کاربران اطلاعی ندارد. از این رو، هنگام سرویس‌دهی به سلول، ABS بالای TBS، یعنی بالای مرکز سلول، به عنوان لایهٔ بالایی که برخی از کاربران به آن متصل می‌شوند، قرار می‌گیرد. بنابراین، بخشی از M کاربر با نسبت کاهش بار داده (ρ_a) ـــــ یعنی در مجموع $\rho_a M$ کاربر ـــــ از طریق ABS بارگذاری یا آفلود می‌شود و سایر کاربران در سلول به میزان $(1-\rho_a)M$ کاربر، همچنان در پوشش ایستگاه زمینی یا TBS قرار دارند. در اینجا، ارتفاع پهپاد معلق یاABS (H_a) است که توسط حدهای بالا و پایین $H_{min} < H_a < H_{max}$ محدود می‌شود و مقادیر H_{min} و H_{max} مطابق مقررات پرواز پهپادها یا اجتناب از موانع قابل تعیین است. در این مدل، TBS نیز با ارتفاع ثابت H_t متر مشخص می‌شود. ارتفاع نسبتاً بالاتر پهپاد یا ABS معمولاً باعث ایجاد لینک‌های ارتباطی LoSبا کیفیت بهتر می‌شود که انگیزهٔ کاهش بار داده یا اتصال برخی از کاربران TBS را به ABS فراهم می‌کند.



شکل (۱): یک مدل پایه برای شبکهٔ سلولی مبتنی بر پهپاد که در آن، یک پهپاد به عنوان یک ایستگاه پایهٔ هوایی یا ABS با ایجاد پوشش مخابراتی برای بخشی از کاربران به کاهش بار داده در ایستگاه پایهٔ زمینی یا TBS کمک می‌کند.

در این مدل، از یک پهپاد با الگوی پروازی منظم برای انجام فرایند شارژ، به عنوان یک ایستگاه پایهٔ هوایی در کنار یک ایستگاه پایهٔ زمینی یا TBS با هدف کاهش بار داده در تعامل با کاربران زمینی با توزیع یکنواخت استفاده شده است. به این ترتیب، تأثیر محدودیت انرژی پهپاد، چگالی ایستگاه‌های شارژ و زمان شارژ یا تعویض بر فرایند کاهش بار داده در شبکهٔ سلولی قابل بررسی است. به طور خاص، از ابزارهای هندسهٔ تصادفی برای استخراج احتمال دسترسی به پهپاد استفاده می‌کنیم. در واقع، براساس مدل ارائه‌شده، ضمن بررسی چالش در دسترس نبودن دائمی پهپاد و تأثیرات آن بر نرخ دادهٔ کاربران هوایی و زمینی و همچنین مجموع نرخ داده، در نهایت، روابط ریاضی مربوط به عملکرد شبکهٔ سلولی مبتنی بر پهپاد استخراج و تحلیل خواهند شد.

۳- فرمول‌بندی مسئله

در این بخش، ما به دنبال به دست آوردن روابط ریاضی مربوط به نرخ کاربران متصل به ABS و TBS و در نهایت، مجموع نرخ دادهٔ کاربران با فرض عدم قطعیت حضور پهپاد به دلیل محدودیت انرژی آن و وقفه‌های ناشی از فرایند شارژ یا

تعویض باتری هستیم. در مدل پیشنهادی، پهپاد به صورت شبه‌استاتیک در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، بخش زیادی از انرژی پیشرانهٔ پهپاد صرف ماندن در ارتفاع ثابت می‌شود. از طرفی، کل توان مصرفی نیروی محرکهٔ یک پهپاد معلق شامل دو بخش، یعنی پروفایل یا شکل آیرودینامیکی پره و توان القایی است. به این ترتیب، P_h به عنوان توان پیشرانش مصرف شده در حالت شناور پهپاد را می‌توان به صورت $P_h = P_0 + P_i$ بیان کرد که در آن، P_0 و P_i ثابت‌هایی هستند که به ترتیب نشان‌دهندهٔ پروفایل پره و توان القایی در وضعیت معلق هستند [۲۱].

در اینجا، فرض می‌شود بیشینهٔ مجموع توان ارتباطی پهپاد در ارتباط با کاربران متصل‌شده برابر P_{max} است. همچنین، مقادیر Q و T نیز به ترتیب به عنوان انرژی کل باتری قابل دسترس پهپاد در شروع مأموریت و زمان کامل عملیات پهپاد در نظر گرفته می‌شوند. تعاریف کامل پارامترهای کانال و دادهٔ استفاده‌شده در این بخش در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): تعریف پارامترهای کانال و داده در لینک‌های زمینی و هوایی

تعریف	پارامتر
توان انتقال ایستگاه پایهٔ *TBS*	P_t
توان انتقال ایستگاه پایهٔ *ABS*	P_a
بهرهٔ توان کانال ارتباطی بین *ABS* و کاربر با فاصلهٔ افقی r	$h_a(r)$
بهرهٔ توان کانال ارتباطی بین *TBS* و کاربر با فاصلهٔ افقی r	$h_t(r)$
تداخل ناشی از کانال مشترک زمینی	$P_t h_t(r)$
تداخل ناشی از کانال مشترک هوایی	$P_a h_a(r)$
مجموع نرخ دادهٔ کاربران AU بدون فرض محدودیت انرژی	R_a^N
مجموع نرخ دادهٔ کاربران TU بدون فرض محدودیت انرژی پهپاد	R_t^N
مجموع نرخ دادهٔ کل کاربران بدون فرض محدودیت انرژی پهپاد	R_T^N
مجموع نرخ دادهٔ کاربران (TU) با فرض محدودیت انرژی پهپاد	R_T^Y
مجموع نرخ دادهٔ کل کاربران	R_T
ضریب افت مسیر لینک‌های ارتباطی TBS	α_t
ضریب افت مسیر لینک‌های ارتباطی ABS	α_a

۳-۱- نرخ داده بدون محدودیت انرژی پهپاد

در ابتدا، برای تضمین انرژی غیرصفر و تأمین مطمئن باتری روی برد داخلی پهپاد [۱۷]، محدودیت انرژی به صورت زیر قابل بیان است:

$$(P_h + P_{max})T < Q \qquad (۱)$$

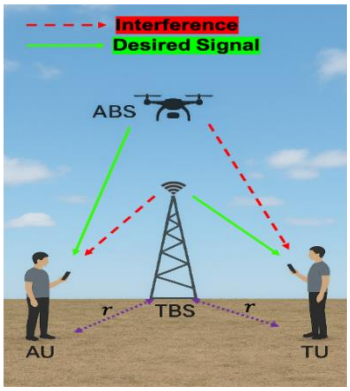
همچنین، فرض می‌شود لینک‌های ارتباطی ABS تحت تأثیر مؤلفه‌های LoS هستند. این مسئله توسط اندازه‌گیری‌های عملی کوالکام[۹]، به ویژه زمانی که پهپاد بالاتر از ارتفاعی مشخص پرواز می‌کند، مطرح است [۲۵]. بنابراین، بهرهٔ توان کانال در مدل مقیاس بزرگ بین ABS و کاربر واقع در فاصلهٔ افقی r تا مرکز سلول برابر است با:

$$h_a(r) = \frac{\beta_0}{(H_a^2 + r^2)^{\frac{\alpha_a}{2}}} \qquad (۲)$$

که در آن، β_0 بیانگر بهرهٔ توان کانال در فاصلهٔ مرجع یک متر است و α_a میزان افت مسیر لینک‌های ارتباطی ABS است. از سوی دیگر، بهرهٔ توان کانال لحظه‌ای بین TBS و کاربر مستقر در فاصلهٔ افقی r تا مرکز سلول برابر است با:

$$h_t(r) = \frac{\beta_0 \chi \varsigma}{(H_t^2 + r^2)^{\frac{\alpha_t}{2}}} = \bar{h}_t(r)\varsigma \qquad (۳)$$

که در آن، $\bar{h}_t(r)$ به معنای بهرهٔ توان کانال در مدل مقیاس بزرگ میان TBS و کاربر است. پارامتر α_t نیز میزان افت مسیر در لینک‌های ارتباطی TBS است. همچنین، χ برابر تلفات اضافی در مقیاس بزرگ است و ς یک پارامتر تصادفی مربوط به محوشدگی[۱۰] مقیاس کوچک است. ضمن در نظر گرفتن سناریوی فروسو[۱۱]، فرض می‌شود هر ایستگاه پایه از دسترسی چندگانهٔ تقسیم فرکانس (FDMA) برای سرویس‌دهی هم‌زمان به کاربران خود استفاده می‌کند که در آن، به هر کاربر، پهنای باند یکسان تخصیص داده می‌شود. در اینجا، کل طیف موجود به طور کامل در ABS و TBS به صورت طرح استفادهٔ مجدد به کار گرفته می‌شود. بنابراین، ممکن است یک کاربر در معرض تداخل ایجادشده از ایستگاه پایهٔ زمینی یا هوایی قرار گیرد.



شکل (۲): سیگنال‌های مطلوب و تداخل در لینک‌های ارتباطی هوایی و زمینی

همان‌طور که در شکل (۲) نیز نشان داده شده است، یک کاربر متصل به ایستگاه پایهٔ TBS (TU) ممکن است در معرض تداخل ایجادشده توسط ABS قرار گیرد. این وضعیت به صورت متقابل برای کاربر متصل به ایستگاه پایهٔ ABS (AU) از طرف TBS نیز وجود دارد. فرض می‌شود P_a و P_t به ترتیب توان‌های انتقال ایستگاه‌های پایهٔ ABS و TBS هستند و شرط $P_a \le P_{max}$ برای پهپاد به عنوان ایستگاه پایهٔ هوایی یا ABS برقرار است. همچنین، در مدل ارائه‌شده، طرح تخصیص توان برابر مفروض است که در آن، کل توان انتقال ایستگاه پایه به طور مساوی به کاربران مرتبط تخصیص داده می‌شود. همچنین، N_0 توان نویز سفید گوسی جمع‌شونده (AWGN) در نظر گرفته می‌شود.

با این توضیحات، نسبت توان سیگنال دریافتی به مجموع توان تداخل و نویز (**SINR**) در یک کاربر **AU** در فاصلهٔ $\boldsymbol{r}$ و زاویهٔ افقی $\boldsymbol{\varphi}$ نسبت به مرکز سلول و با توجه به بهرهٔ توان کانال در رابطهٔ (۲) برابر است با:

$$\gamma_a(r) = \frac{P_a h_a(r)}{P_t h_t(r) + N_0} \qquad (۴)$$

به همین ترتیب، عبارت SINR در یک کاربر TU نیز در فاصلهٔ r و زاویهٔ افقی φ نسبت به مرکز سلول و همچنین با توجه به بهرهٔ توان کانال در رابطهٔ (۳) برابر است با:

$$\gamma_t(r) = \frac{P_t h_t(r)}{P_a h_a(r) + N_0} \qquad (۵)$$

بنابراین، نرخ انتقال داده به یک کاربر AU در سناریوی فروسو مطابق رابطهٔ (۶) قابل تعریف است:

$$R_a^N(r) = \frac{1}{\rho_a M}\log_2\big(1+\gamma_a(r)\big) \qquad (۶)$$

که براساس رابطهٔ (۴) و با جای‌گذاری روابط (۲) و (۳) خواهیم داشت:

$$R_a^N(r) = \frac{1}{\rho_a M}\log_2\left(1+\frac{\frac{P_a\beta_0}{(H_a^2+r^2)^{\frac{\alpha_a}{2}}}}{\frac{P_t\beta_0\chi\varsigma}{(H_t^2+r^2)^{\frac{\alpha_a}{2}}}+N_0}\right) \qquad (۷)$$

با یک استدلال مشابه، نرخ انتقال دادهٔ یک کاربر TU نیز به صورت رابطهٔ (۸) بیان می‌شود:

$$R_t^N(r) = \frac{1}{(1-\rho_a)M}\log_2\left(1+\frac{\frac{P_t\beta_0\chi\varsigma}{(H_t^2+r^2)^{\frac{\alpha_t}{2}}}}{\frac{P_a\beta_0}{(H_a^2+r^2)^{\frac{\alpha_a}{2}}}+N_0}\right) \qquad (۸)$$

بنابراین، مجموع نرخ دادهٔ ارتباط کاربران AU با فرض عدم محدودیت انرژی و چگالی توزیع ρ، به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$R_a^N = \int_0^{2\pi}\int_0^{r_c}\rho R_a^N(r)\,r\,dr\,d\varphi \qquad (۹)$$

در اینجا، به دست آوردن یک عبارت فرم بسته برای R_a^N با اعمال ضریب‌های متفاوت افت مسیرهای زمینی (α_t) و هوایی (α_a) بسیار چالش‌برانگیز است. بنابراین، با فرض محیط فضای آزاد، مقادیر افت مسیر یکسان $(\alpha_a = \alpha_t = 2)$ و تعاریف $\lambda = P_t\chi\varsigma$، $\eta = \frac{r_c^2}{\lambda}$، $\psi = \frac{H_t^2}{\lambda}$ و $\mu = \psi + \eta$، می‌توان پس از ساده‌سازی ریاضی، یک عبارت فرم بسته برای مجموع نرخ دادهٔ ارتباط کاربران AU به دست آورد:

$$\begin{aligned} R_a^N = \frac{1}{\rho_a(\eta P_a + r_c^2)}\Big(&\Big(\frac{P_a}{\lambda}+1\Big)H_a^2\log_2(H_a^2) \\ &+(\mu P_a + r_c^2 + H_a^2)\log_2(\mu P_a + r_c^2 + H_a^2) \\ &-\Big(\frac{P_a}{\lambda}+1\Big)(r_c^2+H_a^2)\log_2(r_c^2+H_a^2) \\ &-(\psi P_a + H_a^2)\log_2(\psi P_a + H_a^2)\Big). \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

از سوی دیگر، مجموع نرخ دادهٔ ارتباط کاربران TU نیز به شکل مشابه مطابق رابطهٔ (۱۱) قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} R_t^N = \frac{1}{(1-\rho_a)(\eta P_a + r_c^2)}\Big(&(\mu P_a + r_c^2 + H_a^2) \\ &\log_2(\mu P_a + r_c^2 + H_a^2) \\ &-\mu(P_a+\lambda)\log_2(r_c^2+H_t^2) \\ &-(\eta P_a + r_c^2)\log_2\Big(\frac{P_a}{\lambda}\Big) \\ &-(\psi P_a + H_a^2)\log_2(\psi P_a + H_a^2) \\ &+(\psi P_a + H_t^2)\log_2(H_t^2)\Big). \end{aligned} \qquad (۱۱)$$

در نتیجه، مجموع نرخ انتقال دادهٔ تمام کاربران در یک سلول بدون محدودیت انرژی پهپاد به صورت رابطهٔ (۱۲) نوشته می‌شود:

$$R_T^N = R_a^N + R_t^N \quad (۱۲)$$

۳-۲- نرخ داده با محدودیت انرژی پهپاد

مطابق یک سیستم چندسلوله (شکل (۳))، در هر سلول یک پهپاد بالای TBS در مرکز سلول یا ناحیهٔ پوشش رادیویی قرار دارد. البته، در محاسبات مربوط به نرخ داده، تمرکز ما مطابق بخش‌های قبل بر روی یک سلول بدون اثرپذیری تداخلی از سلول‌های دیگر خواهد بود. در این حالت، نواحی پوشش به عنوان دیسک‌های تصادفی با شعاع ثابت r_c مدل‌سازی می‌شوند و مراکز این دیسک‌ها که بیانگر مکان پهپادها در نقش ایستگاه‌های هوایی یا ABS نیز هستند، به عنوان یک فرایند نقطه‌ای پواسون (PPP) مدل‌سازی می‌شوند. هر دیسک شامل یک توزیع یکنواخت از کاربران درون آن است. مانند قبل، فرض می‌شود پهپادها در ارتفاعی ثابت از مرکز هر سلول قرار دارند. در این سناریو، هر پهپاد باید قبل از تمام‌شدن انرژی، خود را به نزدیک‌ترین ایستگاه شارژ برساند و برگردد. برای مطالعهٔ تأثیر توزیع فضایی ایستگاه‌های شارژ بر عملکرد شبکه، مکان ایستگاه‌های شارژ نیز به صورت PPP و با چگالی λ_c مدل‌سازی می‌شود. در طول سفر به سمت ایستگاه شارژ، همچنین در طول زمان شارژ مجدد و در مسیر بازگشت، پهپاد غیرقابل دسترس است و نمی‌تواند خدماتی ارائه دهد. بنابراین، می‌توان گفت احتمال دسترسی به پهپاد (ρ_u) مشروط به فاصلهٔ بین مرکز سلول و نزدیک‌ترین ایستگاه شارژ (R_s) و به صورت زیر قابل بیان است:

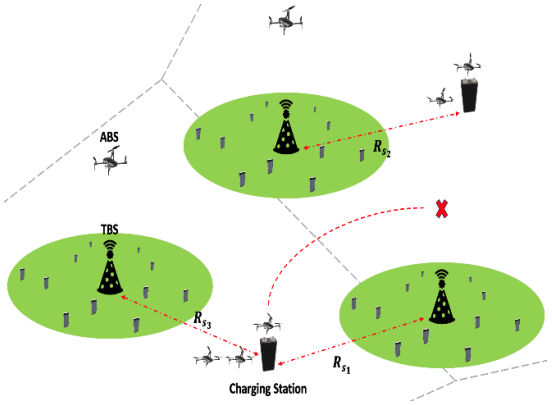
$$\rho_{u|R_s} = \frac{T_{\text{se}}}{T_{\text{se}} + T_{\text{ch}} + T_{\text{tra}}} \quad (۱۳)$$

که در آن، T_{ch} بیانگر زمان کل مورد نیاز برای شارژ یا تعویض باتری پهپاد است. همچنین، T_{tra} زمان مورد نیاز برای سفر پهپاد به نزدیک‌ترین ایستگاه شارژ و بازگشتش به مرکز سلول و T_{se} مدت زمان حضور پهپاد در مرکز سلول و در نقش ایستگاه پایهٔ هوایی یا ABS است که مطابق روابط (۱۴) و (۱۵) قابل محاسبه هستند:

$$T_{\text{tra}} = \frac{2R_{\text{s}}}{V} \quad (۱۴)$$

$$T_{\text{se}} = \frac{B_{max} - 2P_{\text{m}}\frac{R_{\text{s}}}{V}}{P_{\text{s}}} \quad (۱۵)$$

تعریف پارامترهای اشاره‌شده در جدول (۳) آمده است. توجه شود که در تحلیل مصرف توان حین جابجایی پهپاد، تمرکز بر توان مصرفی برای طی‌کردن فاصلهٔ افقی R_s است؛ زیرا این مقدار معمولاً از توان مصرف‌شده در مرحلهٔ فرود، در لحظهٔ رسیدن به ایستگاه شارژ، بیشتر است.



شکل (۳): مدل یک شبکهٔ چندسلوله با ایستگاه‌های شارژ توزیع‌شده و پهپادهای شناور در حال سرویس در مراکز سلول یا در حال انجام فرایند شارژ

با جای‌گذاری روابط (۱۴) و (۱۵) در رابطهٔ (۱۳)، احتمال شرطی در دسترس بودن پهپاد (با شرط مشخص‌بودن R_{s}) به صورت زیر قابل ارائه است:

$$\rho_{u|R_s} = \frac{B_{max}V - 2P_{\text{m}}R_{\text{s}}}{B_{max}V - 2P_{\text{m}}R_{\text{s}} + T_{\text{ch}}P_{\text{s}}V + 2R_{\text{s}}P_{\text{s}}} \quad (۱۶)$$

در اینجا، مقدار توان P_{s} ثابت در نظر گرفته می‌شود، در حالی که مقدار P_{m} به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۶]:

$$P_{\text{m}} = P_0\left(1 + \frac{3V^2}{U_{\text{tip}}^2}\right) + \frac{P_{\text{i}}v_0}{V} + \frac{1}{2}d_0\rho_{air}AV^3 \quad (۱۷)$$

که در آن، A مساحت دیسک پره، d_0 نسبت مقاومت بدنه، V سرعت پهپاد و توان‌های P_0 و P_{i} به ترتیب نشان‌دهندهٔ توان پروفایل پره و توان القایی در حالت شناوربودن است. تعریف سایر پارامترهای اشاره‌شده در جدول

(۳) آمده است.

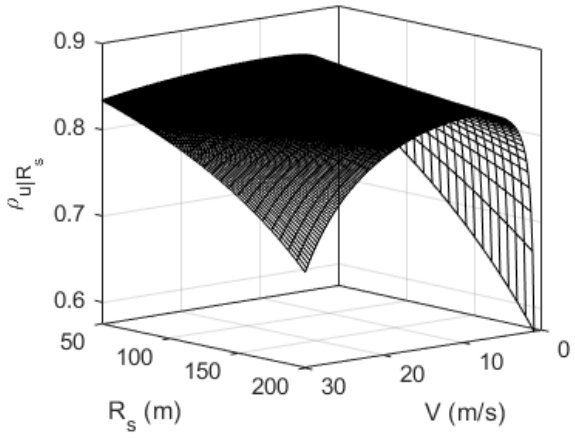
جدول (۳): تعریف پارامترهای پروازی و زمان‌های شارژ پهپاد

پارامتر	تعریف
T_{tra}	زمان پرواز به نزدیک‌ترین ایستگاه شارژ و بازگشت به مرکز سلول
T_{se}	زمان صرف‌شده برای ارائهٔ سرویس به کاربران
T_{ch}	زمان مورد نیاز برای شارژ یا تعویض باتری پهپاد
B_{max}	ظرفیت باتری پهپاد
P_m	توان مصرفی حین جابجایی
V	سرعت پروازی پهپاد
P_s	توان مصرفی پیشرانش و ارتباطی در حالت شناور
U_{tip}^2	حداکثر سرعت پرهٔ روتور
v_0	میانگین سرعت پره در حالت شناور
H_a	ارتفاع پروازی پهپاد یا ایستگاه پایهٔ هوایی
ρ_{air}	چگالی هوا

بنابراین، انرژی مصرف‌شده در طول سفر به یا از ایستگاه شارژ نیز قابل محاسبه است:

$$E_t = \frac{R_s}{V}\left(P_0\left(1+\frac{3V^2}{U_{\mathrm{tip}}^2}\right)+\frac{P_i v_0}{V}+\frac{1}{2}d_0\rho_{air}AV^3\right) \qquad (۱۸)$$

واضح است که در عمل، عوامل محیطی مانند وزش باد [۲۷] بر میزان احتمال در دسترس بودن پهپاد از طریق تغییرات سرعت پروازی پهپاد (V) اثرگذار هستند. در واقع، راهبردهای کاهش مصرف انرژی و همچنین مسیریابی و سرعت بهینه در کاربردهای مختلف یا در حضور عوامل محیطی [۲۷، ۲۸] با اثرگذاری بر پارامترهای P_{m}، V و R_{s} بر میزان کاهش یا افزایش این احتمال مؤثر هستند. برای مشاهدهٔ نحوهٔ اثرگذاری این پارامترها بر میزان احتمال شرطی در دسترس بودن پهپاد، شکل (۴) ارائه شده است. گفتنی است، نوآوری اصلی این پژوهش ماهیتاً با کارهای رایج در حوزهٔ کاهش مصرف انرژی یا طراحی مسیر پرواز متفاوت است. این مدل، برخلاف مقاله‌های پیشین، اثر محدودیت انرژی پهپاد را به شکل یک متغیر تصادفی وارد تحلیل احتمال در دسترس بودن پهپاد و در نهایت، مجموع نرخ دادهٔ کاربران می‌کند. همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، افزایش مقدار R_{s} موجب کاهش احتمال شرطی $\rho_{u|R_s}$ خواهد شد. از طرف دیگر، تغییرات سرعت پروازی پهپاد (برای مثال، بر اثر عوامل محیطی مانند باد) نیز یک نقطهٔ بهینه برای تغییرات این احتمال را برای یک مقدار معین R_{s} نشان می‌دهد.



شکل (۴): تأثیر پارامترهای سرعت پروازی پهپاد (V) و فاصله تا نزدیک‌ترین ایستگاه شارژ (R_s) بر روی احتمال شرطی در دسترس بودن پهپاد ($\rho_{u|R_s}$)

در ادامه، می‌توان احتمال دسترسی به پهپاد را با گرفتن امید ریاضی از احتمال شرطی مندرج در رابطهٔ (۱۳) محاسبه کرد:

$$\rho_u = \mathbb{E}_{R_s}[\rho_{u|R_s}] = \mathbb{E}_{R_s}\left[\frac{T_{\mathrm{se}}}{T_{\mathrm{se}}+T_{\mathrm{ch}}+T_{\mathrm{tra}}}\right] \qquad (۱۹)$$

گفتنی است، بیشینهٔ احتمال دسترسی به پهپاد با در نظر گرفتن محدودیت انرژی در حالت $R_s = 0$ به دست می‌آید. در این صورت، خواهیم داشت:

$$\rho_{u|R_s=0} = \frac{B_{max}}{B_{max}+P_s T_{\mathrm{ch}}} \qquad (۲۰)$$

اما محاسبهٔ میزان متوسط این احتمال (رابطهٔ ۱۹) با توجه به توزیع متغیر تصادفی R_s به عنوان متغیر فاصلهٔ مرکز سلول تا نزدیک‌ترین ایستگاه شارژ ممکن است [۵، ۲۶]. بر این اساس، تابع توزیع تجمعی احتمال شرطی به صورت رابطهٔ (۲۱) قابل بیان است:

$$F_{\rho_{u|R_s}}(x) = e^{-\lambda_c \pi C(x)^2} \qquad (۲۱)$$

که در آن،

$$C(x) = \frac{V(B_{max}(x-1) + P_s T_{ch} x)}{2(P_m(x-1) - P_s x)} \quad (۲۲)$$

$$0 \le x \le \frac{B_{max}}{P_s T_{ch} + B_{max}} \quad (۲۳)$$

و در نهایت، احتمال دسترسی به پهپاد (ρ_u) با فرض محدودیت انرژی با انتگرال‌گیری روی متغیر x در یک بازه شامل مقادیر ممکن برای R_s محاسبه می‌شود:

$$\rho_u = \int_0^{\frac{B_{max}}{P_s T_{ch} + B_{max}}} 1 - e^{-\lambda_c \pi C(x)^2} \mathrm{d}x \quad (۲۴)$$

به این ترتیب، در ادامه، با در نظر گرفتن این احتمال، محاسبهٔ نرخ دادهٔ کاربران در حالت محدودیت انرژی پهپاد امکان‌پذیر خواهد بود.

در سناریوی در دسترس نبودن پهپاد به عنوان ایستگاه پایهٔ هوایی یا ABS به دلیل فرایند شارژ، تمام کاربران به ایستگاه پایهٔ زمینی یا TBS متصل می‌شوند. در این حالت، تداخلی از جانب پهپاد در کاربران یا گیرنده‌های فعال دریافت نمی‌شود. بنابراین، عبارت $SINR$ در رابطهٔ (۵) بدون عبارت مربوط به تداخل و به صورت نسبت توان سیگنال به توان نویز (SNR) قابل محاسبه است. به این ترتیب، عبارت نرخ یک کاربر TU در فاصلهٔ r و زاویهٔ افقی φ نسبت به مرکز سلول و هنگامی که پهپاد در دسترس نیست، به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$R_t^Y(r) = \frac{1}{M}\log_2\left(1 + \frac{\frac{P_t \beta_0 \chi \varsigma}{(H_t^2 + r^2)^{\frac{\alpha_t}{2}}}}{N_0}\right) \quad (۲۵)$$

بنابراین، مجموع نرخ دادهٔ ارتباط کاربران تماماً از نوع TU و با فرض چگالی توزیع ρ و همچنین تداخل صفر از طرف پهپاد یا ایستگاه هوایی، به صورت رابطهٔ (۲۶) قابل محاسبه است:

$$R_T^Y = \int_0^{2\pi}\int_0^{r_c} \rho R_t^Y(r) r dr d\varphi \quad (۲۶)$$

۳-۳- مجموع نرخ دادهٔ کاربران

در نهایت، با استناد به نتایج به‌دست‌آمده در زیربخش‌های (۳-۱) و (۳-۲) به ترتیب برای حالت‌های بدون محدودیت انرژی پهپاد (امکان دسترسی دائمی بخشی از کاربران به پهپاد) و با فرض محدودیت انرژی پهپاد و احتمال عدم دسترسی بخشی از کاربران به پهپاد به دلیل انجام فرایند شارژ یا تعویض باتری پهپاد، مجموع نرخ دادهٔ کاربران به صورت رابطهٔ (۲۷) قابل بیان است:

$$R_T = \rho_u R_T^N + (1-\rho_u) R_T^Y \quad (۲۷)$$

که در آن، R_T^N نمایانگر نرخ داده در سناریوی دسترسی دائمی به پهپاد در حالت بدون محدودیت انرژی و عبارت R_T^Y نیز نشان‌دهندهٔ نرخ داده در سناریوی احتمال در دسترس نبودن پهپاد با فرض محدودیت انرژی است.

٤- نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری

در این بخش، ضمن شبیه‌سازی شبکه‌های سلولی مبتنی بر پهپاد به کمک نرم‌افزار MATLAB و با در نظر گرفتن فاکتور عدم قطعیت حضور پهپاد، نتایج کاهش بار داده و عملکرد مدل سیستم پیشنهادی تحت تأثیر پارامترهای مختلف آن را تحلیل خواهیم کرد. در این مدل، سیستم شبیه‌سازی‌شده بر اساس مفروضاتی از جمله توزیع فرایند نقطه‌ای پواسون برای ایستگاه‌های شارژ شکل گرفته است. مقادیر پارامترهای مهم در شبیه‌سازی کامپیوتری در جدول (٤) آمده است.

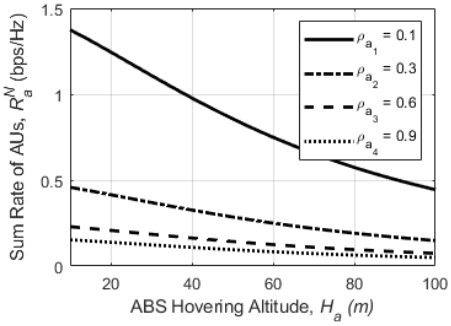
٤-١- سناریوی پهپاد بدون محدودیت انرژی

شکل (٥) مقدار مجموع نرخ کاربران AU (R_a^N) برحسب ارتفاع پهپاد (H_a) را برای مقادیر مختلف نسبت آفلود یا کاهش بار داده (ρ_a) نشان می‌دهد. در این نمودار، R_a نشان‌دهندهٔ نرخ کلی کاربران AU است که به پهپاد (ABS) متصل شده‌اند. از آنجا که پهپاد در ارتفاعاتی مختلف قرار می‌گیرد (از ده تا صد متر)، تأثیر این ارتفاع بر روی R_a^N قابل مشاهده است. با افزایش ارتفاع پهپاد، توان سیگنالی که پهپاد به کاربران ارائه می‌دهد، کاهش می‌یابد. در این حالت، اثر تداخلی ناشی از ارتباطات کاربران TU با ایستگاه TBS نیز غلبه می‌شود و در نتیجه، نرخ داده یا سرعت انتقال دادهٔ کاربران AU کاهش می‌یابد. در اینجا، برای مشاهدهٔ تأثیر تغییر پارامتر ρ_a، چهار مقدار مختلف مرتب‌شده از کمترین (ρ_{a1}) تا بیشترین (ρ_{a4}) در نظر گرفته شده است.

جدول (٤): مقادیر پارامترها در شبیه‌سازی یک شبکهٔ سلولی مبتنی بر پهپاد

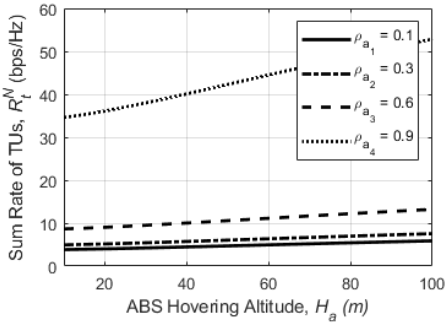
r_c	$100\ m$	شعاع سلولی
P_t	$30\ dBm$	توان انتقال دادهٔ ایستگاه پایهٔ زمینی
β_0	$-40\ dB$	بهرهٔ توان کانال در فاصلهٔ مرجع
N_0	$-90\ dBm$	توان نویز سفید گوسی
χ	$1.5\ dB$	تلفات مقیاس بزرگ افزوده
Q	$278\ Wh$	انرژی کل باتری قابل دسترس در آغاز عملیات
α_t	2	ضریب افت مسیر لینک‌های ارتباطی TBS
α_a	2	ضریب افت مسیر لینک‌های ارتباطی ABS
H_a	$10\ m$	ارتفاع پروازی پهپاد
P_a	$0.3dBm$	توان ارسال دادهٔ پهپاد
ς	2	پارامتر تصادفی محوشدگی مقیاس کوچک
H_t	$10\ m$	ارتفاع ایستگاه پایهٔ زمینی
P_{max}	1	بیشینهٔ مجموع توان ارتباطی پهپاد
T	$1.6\ h$	دورهٔ زمانی عملیات پهپاد
ρ	0.1	چگالی توزیع کاربران در واحد سطح
ρ_a	0.9	نسبت کاهش بار دادهٔ پهپاد (نسبت کاربران AU به کل کاربران)
P_h	$170.89\ w$	توان پیشرانش مصرف‌شده در حالت شناور

همان‌طور که انتظار می‌رفت، هر چقدر مقدار ρ_a بیشتر شود، کاربران بیشتری تمایل به برقراری ارتباط با پهپاد خواهند داشت که این قضیه، اگرچه به دلیل کاهش بار داده از روی TBS مطلوب است، با افزایش ترافیک داده در ABS و در نتیجه، تقسیم پهنای بلند بین تعداد بیشتری از کاربران، در نهایت، سبب کاهش مجموع نرخ دادهٔ کاربران AU می‌شود.

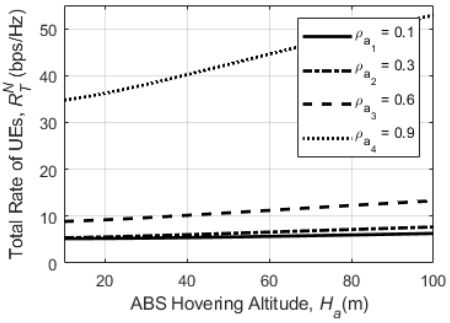


شکل (٥): مجموع نرخ دادهٔ کاربران هوایی برحسب ارتفاع پهپاد

در ادامه، استدلالی مشابه بر روی کاربران زمینی نیز قابل بیان است. در واقع، همین مسئله در شکل (٦) برای مجموع نرخ دادهٔ کاربران زمینی یا TU (R_t^N) مطرح شده است. در این شکل، تغییرات مربوط به R_t^N برحسب ارتفاع پهپاد (H_a) و برای مقادیر مختلف نسبت کاهش بار داده (ρ_a) ترسیم شده است. بر این اساس، می‌توان گفت هرچه پهپاد بالاتر برود، تداخل کمتری برای کاربران متصل به TBS ایجاد می‌کند و این امر باعث افزایش کیفیت خدمات به کاربران TBS می‌شود. استدلالی مشابه برای بیان اثرات تغییر مقدار ρ_a نیز وجود دارد. وقتی پهپاد کمتر آفلود انجام می‌دهد (معادل است با مقدار ρ_a کمتر)، تعداد بیشتری از کاربران به TBS متصل می‌شوند. در نتیجه، پهنای باند TBS برای تعداد بیشتری از کاربران تقسیم می‌شود و کاربران تجربهٔ نرخی پایین‌تر را خواهند داشت. در مقابل، با افزایش مقدار ρ_a، پهپاد کاربران بیشتری را به خود جذب می‌کند و در نتیجه، تعداد کمتری از کاربران به TBS ملحق خواهند شد. بنابراین، کاربران TU به‌تدریج خدماتی بهتر دریافت می‌کنند و این مسئله، در نهایت، به افزایش مجموع نرخ کاربران R_t^N منجر می‌شود. رفتار نمودار مجموع نرخ کل کاربران هوایی و زمینی (R_T^N) در شکل (٧) نیز روندی مشابه نمودار کاربران زمینی یا TU در شکل (٦) را نشان می‌دهد؛ زیرا کاربران TU به نسبت کاربران AU دارای نرخ دادهٔ به‌مراتب بزرگ‌تری هستند؛ به ویژه زمانی که ارتفاع پهپاد بالاست و اثر تداخلی آن بر کاربران TU کاهش می‌یابد. با این تحلیل، می‌توان نتیجه گرفت ارتفاع پهپاد و مقدار کاهش بار داده از عوامل بسیار تأثیرگذار بر میزان تداخل و در نتیجه، مجموع نرخ کل کاربران هوایی و زمینی هستند. همچنین، با افزایش مقدار ρ_a، تعداد کاربران TU کاهش می‌یابد و بنابراین، با تخصیص پهنای باند بیشتر به این کاربران، در نهایت، موجب افزایش مقدار R_T^N می‌شود.

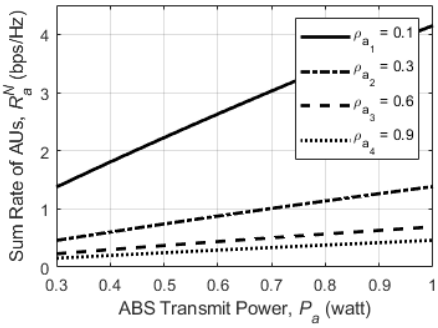


شکل (٦): مجموع نرخ دادهٔ کاربران زمینی برحسب ارتفاع پهپاد

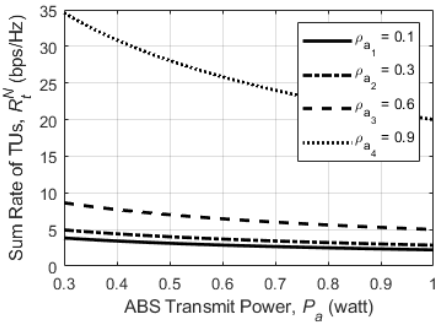


شکل (۷): مجموع نرخ دادهٔ کل کاربران برحسب ارتفاع پهپاد

در شکل (۸)، تأثیر توان ارسال پهپاد (P_a) و نسبت کاهش بار داده (ρ_a) بر مجموع نرخ دادهٔ کاربران هوایی (AU) متصل به پهپاد (R_a^N) بررسی شده است. می‌توان گفت، با فرض ارتفاع ثابت پهپاد یا ABS، هرچه میزان توان ارسال P_a بیشتر باشد، تأثیری بسزا بر روی کیفیت لینک ارتباطی AU–ABS خواهد داشت؛ به این معنا که با افزایش مقدار P_a، کاربران متصل به پهپاد توانایی دریافت سیگنال قوی‌تری دارند و در نتیجه، مطابق رابطهٔ شانون برای نرخ داده (رابطهٔ ۷)، این کاربران نرخ دادهٔ بیشتری را تجربه می‌کنند. با این حال، باید توجه داشت که افزایش توان ارسال P_a ممکن است بر روی کاربران زمینی (TU) دارای تأثیر معکوس و عاملی برای تداخل باشد. همچنین، می‌توان نتیجه گرفت پارامتر ρ_a کمتر به معنای اتصال کمتری از کاربران به پهپاد است و وقتی تعداد کمتری از کاربران به پهپاد متصل شوند، پهپاد سرویس بهتری به کاربران خود ارائه می‌دهد. در ادامه، تأثیر افزایش توان ارسال پهپاد (P_a) بر روی مجموع نرخ دادهٔ کاربران زمینی یا TU (R_t^N) نیز بررسی شده است. شکل (۹) نشان می‌دهد تغییرات در نرخ دادهٔ کاربران تحت پوشش TBS در پاسخ به افزایش توان پهپاد دارای الگوهایی خاص است. در این تحلیل، با فرض ارتفاع ثابت پهپاد و همچنین با افزایش توان ارسال پهپاد، نرخ دادهٔ کاربران TU به علت افزایش تداخل ناشی از پهپاد یا ABS کاهش می‌یابد. تحلیل مربوط به تأثیر تغییرات ρ_a برروی R_t نیز مشابه تحلیل‌های قبلی است.



شکل (۸): مجموع نرخ دادهٔ کاربران هوایی برحسب توان ارسال پهپاد

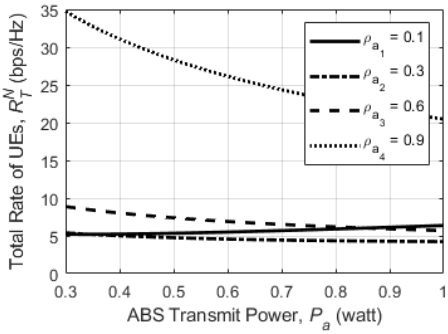


شکل (۹): مجموع نرخ دادهٔ کاربران زمینی برحسب توان ارسال پهپاد

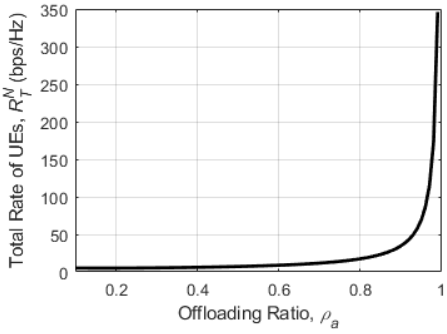
با توجه به اینکه کاربران TBS به نسبت کاربران متصل به ABS دارای نرخ دادهٔ به‌مراتب بزرگ‌تری هستند، رفتار مجموع نرخ دادهٔ کل کاربران نیز روندی مشابه نمودار نرخ کاربران متصل به TBS در شکل (۹) قابل انتظار است. به عبارت دیگر، همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، با افزایش توان ارسال پهپاد و در نتیجه، با بالارفتن میزان تداخل ایجادشده بر روی کاربران متصل به TBS، در نهایت، مجموع نرخ دادهٔ کل کاربران توزیع‌شده در سلول کاهش می‌یابد.

در تکمیل ارزیابی سناریوی بدون محدودیت انرژی و در دسترس بودن دائمی پهپاد، تأثیر نسبت ρ_a بر مجموع نرخ دادهٔ کل کاربران هوایی و زمینی بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود، مقادیر کوچک ρ_a به این معناست که تعداد کاربران متصل به پهپاد بسیار کم و در عوض تعداد کاربران متصل به TBS بسیار زیاد است. در نتیجهٔ این موضوع، پهنای باند موجود برای پهپاد بین تعداد بسیار کمی از کاربران تقسیم می‌شود و این به معنای تجربهٔ نرخ دادهٔ زیاد

این کاربران است، در حالی که پهنای باند موجود برای TBS بین تعداد زیادی از کاربران تقسیم می‌شود و این به معنای تجربهٔ نرخ دادهٔ بسیار کم این کاربران است. در نهایت، برای مقادیر بسیار کم ρ_a نرخ مجموع کل کاربران هوایی و زمینی (R_T^N) بیشتر متأثر از نرخ کاربران زمینی است. با افزایش مقدار ρ_a این روند به‌تدریج معکوس می‌شود و تعداد کاربران متصل به پهپاد یا ABS بیشتر می‌شود و تعداد کاربران متصل به TBS کاهش می‌یابد. بنابراین، کاربران متصل به TBS نرخ بسیار بالاتری را تجربه خواهند کرد که در نهایت، باعث افزایش مجموع نرخ دادهٔ کاربران زمینی یا TU (R_t^N) و متعاقباً مجموع نرخ کل کاربران (R_T^N) خواهد شد. باید به این نکته توجه کرد که توان ارسال TBS به‌مراتب بیشتر از توان ارسال پهپاد است و علت عدم تقارن نمودار برای مقادیر بسیار کم و بسیار زیاد ρ_a به همین دلیل است. مشاهده می‌شود برای مقادیر بزرگ ρ_a پهپاد در کاهش بار ترافیکی TBS و در نتیجه، افزایش نرخ کل، نقشی مهم‌تر ایفا می‌کند.



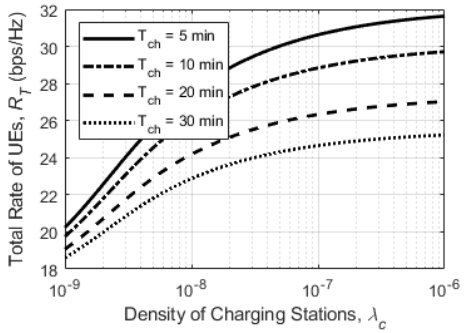
شکل (۱۰): مجموع نرخ دادهٔ کل کاربران برحسب توان ارسال دادهٔ پهپاد



شکل (۱۱): مجموع نرخ دادهٔ کاربران هوایی و زمینی برحسب نسبت آفلود ρ_a

۴-۲- سناریوی پهپاد با محدودیت انرژی

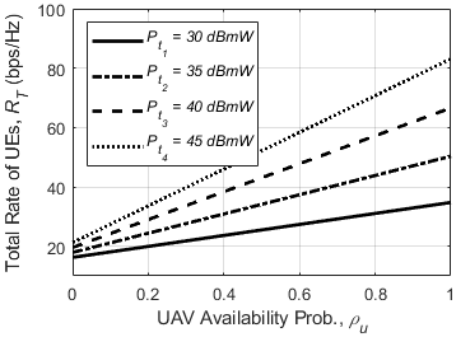
با توجه به تحلیل‌های پیشین، میزان نرخ دادهٔ کل کاربران هوایی و زمینی بستگی زیادی به چگالی ایستگاه‌های شارژ (λ_c) و مدت زمان شارژ پهپاد (T_{ch}) دارد. با افزایش تعداد ایستگاه‌های شارژ، پهپاد برای رفت‌وآمد به نزدیک‌ترین ایستگاه شارژ مسافت کمتری را طی می‌کند و به‌سرعت باتری خود را شارژ می‌کند و به محل سرویس‌دهی بازمی‌گردد و وقفهٔ کمتری در عملیات آفلودینگ یا کاهش بار داده ایجاد خواهد شد. به این ترتیب، انتظار می‌رود مجموع نرخ دادهٔ کاربران (R_T) افزایش یابد. در شکل (۱۲)، رفتار نمودارها برای چهار مورد زمان شارژ مفروض نیز مؤید این مسئله است.



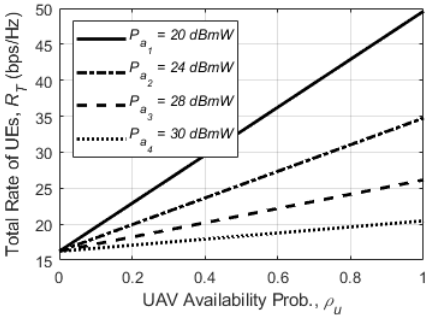
شکل (۱۲): مجموع نرخ دادهٔ کاربران برحسب λ_c برای مقادیر مختلف T_{ch}

در شکل (۱۳) نیز مقدار مجموع نرخ کل کاربران هوایی و زمینی (R_T) برحسب احتمال در دسترس بودن پهپاد (ρ_u) و در ازای مقادیر مختلف توان ارسال ایستگاه پایهٔ زمینی (P_t) و نسبت کاهش بار داده برابر $\rho_a = 0.9$ ترسیم شده است. با توجه به نقش پهپاد در کاهش بار ترافیکی TBS به ویژه برای مقادیر بزرگ ρ_a، با افزایش احتمال در دسترس بودن پهپاد مقدار R_T افزایش می‌یابد. در واقع، در حالتی که ρ_a مقداری بزرگ انتخاب شود، اگر توان ارسال TBS (P_t) نیز افزایش یابد و توان ارسال پهپاد ثابت باشد، مقدار R_T نیز بزرگ‌تر خواهد شد، به ویژه وقتی احتمال در دسترس بودن پهپاد یا ρ_u بیشتر باشد. در شرایط مشابه، با فرض توان ثابت برای TBS ($P_t = 30dBm$)، این بار اثر تغییرات توان ABS (پهپاد) بر مقدار R_T نیز قابل ارزیابی است. همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، مقدار R_T با افزایش توان ارسال پهپاد (P_a) و

به دنبال آن افزایش تداخل ناشـــی از لینک‌های ABS-AU بر روی لینک‌های TBS-TU کاهش می‌یابد.

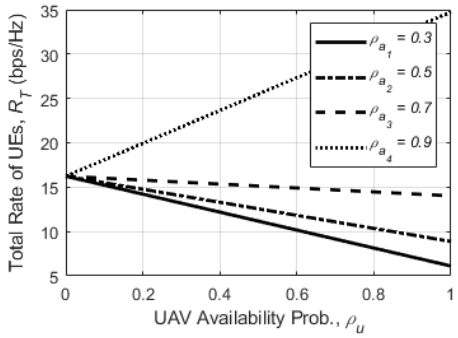


شکل (۱۳): مجموع نرخ دادهٔ کاربران برحسب احتمال در دسترس بودن پهپاد (ρ_u) برای مقادیر مختلف توان ارسال (P_t)TBS

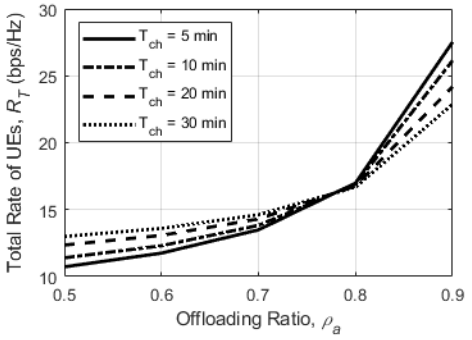


شکل (۱٤): مجموع نرخ دادهٔ کاربران برحسب احتمال در دسترس بودن پهپاد (ρ_u) برای مقادیر مختلف توان ارسال پهپاد (P_a)

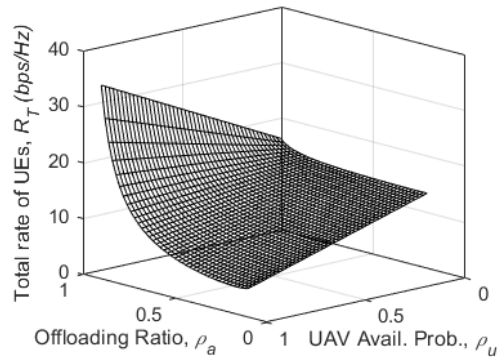
در شکل (۱۵)، تغییرات مجموع نرخ دادهٔ کاربران R_T نیز برحسب احتمال در دسترس بودن پهپاد و برای مقادیر مختلف نسبت کاهش بار داده رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار R_T فقط در صورتی هم‌زمان با افزایش احتمال در دسترس بودن پهپاد افزایش می‌یابد که اثربخشی پهپاد (در تخلیه و کاهش بار ترافیکی TBS) بر تداخل ناشی از پهپاد بر روی کاربران متصل به TBS غالب شود و این مهم زمانی محقق خواهد شد که نسبت ρ_a مقادیری بزرگ اختیار کند. شکل (۱٦) نیز نشان می‌دهد به‌ازای مقادیر بزرگ ρ_a، مقدار R_T از رشد بیشتری برخوردار است. البته، این میزان رشد برای حالتی که احتمال ρ_u بالا باشد (معادل زمان شارژ (T_{ch}) کمتر)، بیشتر نیز خواهد بود. برای درک بهتر اثرات پارامترهای ρ_u و ρ_a بر مجموع نرخ دادهٔ کاربران (R_T)، شکل (۱۷) برای مقدار ثابت T_{ch} به صورت نمودار سه‌بُعدی ترسیم شده است.



شکل (۱۵): مجموع نرخ دادهٔ کاربران برحسب احتمال در دسترس بودن پهپاد (ρ_u) برای مقادیر مختلف نسبت کاهش بار داده

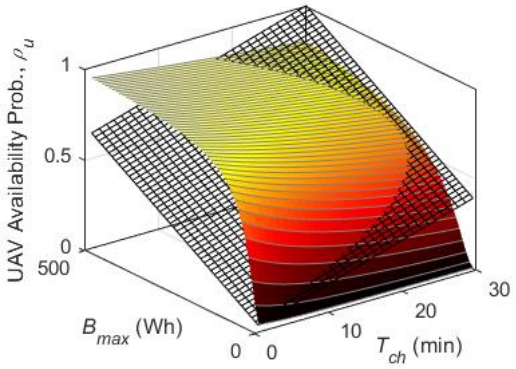


شکل (۱٦): مجموع نرخ دادهٔ کاربران برحسب نسبت کاهش بار داده برای مقادیر مختلف زمان شارژ T_{ch}



شکل (۱۷): مجموع نرخ دادهٔ کاربران برحسب احتمال در دسترس بودن پهپاد (ρ_u) و نسبت کاهش بار داده (ρ_a) برای زمان شارژ پهپاد ثابت ($T_{\text{ch}} = 10\ min$)

نمودار شکل (۱۸) برای محاسبهٔ احتمال در دسترس بودن پهپاد برحسب زمان شارژ پهپاد در ایستگاه شارژ و ظرفیت باتری پهپاد و با هدف ارائهٔ یک چارچوب طراحی بهینه برای پژوهشگران در این حوزه ارائه شده است. واضح است، ناحیهٔ ایده‌آل برای طراحی بهینهٔ فرایند کاهش بار داده مبتنی بر پهپاد جایی است که مقادیر B_{max} بالاتر و T_{ch} کمتر در دسترس باشند که در شکل (۱۸)، این ناحیه بالای صفحهٔ توری خاکستری رنگ قرار خواهد گرفت.



شکل (۱۸): احتمال در دسترس بودن پهپاد برحسب زمان شارژ پهپاد در ایستگاه شارژ (T_{ch}) و ظرفیت باتری پهپاد ($B_{\max}$)

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نقش پهپادها به عنوان ایستگاه‌های پایهٔ هوایی در کاهش بار ترافیکی شبکه‌های سلولی با در نظر گرفتن محدودیت انرژی پهپاد بررسی شد. به منظور ارزیابی این مسئله، دو سناریو بررسی شدند: ابتدا، سناریویی که پهپاد دارای محدودیت انرژی نیست و در فرایند آفلود یا کاهش بار داده ایستگاه مرکزی یا زمینی مشارکت کامل دارد، تحلیل شد و روابط مربوط به مجموع نرخ برای تمامی کاربران استخراج شدند. در سناریوی دوم نیز، مسئلهٔ کاهش بار داده مبتنی بر پهپاد با فرض واقع‌بینانهٔ محدودیت انرژی تحلیل شد. در این حالت، برای نشان‌دادن اثر محدودیت انرژی، فاکتوری با نام احتمال دسترسی به پهپاد تعریف و بر اساس زمان‌های شارژ و موقعیت ایستگاه‌های شارژ محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد استقرار پهپادها می‌تولند به طور مؤثر حجم داده‌ها را در نقاط مرکزی و پرترافیک شبکه کاهش دهد و به بهینه‌سازی زیرساخت‌های شبکه کمک کند. با این حال، چالش‌هایی مانند محدودیت ظرفیت باتری و نیاز به بازگشت به ایستگاه‌های شارژ برای حفظ عملکرد بهینه وجود دارند. این پژوهش می‌تواند مبنایی مناسب برای توسعهٔ راهکارهای واقع‌گرایانه در بهبود کیفیت خدمات شبکه‌های بی‌سیم مبتنی بر پهپاد در آینده باشد.

۶- مراجع

[1] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. Nam, M. Debbah, “A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 21, No. 3, pp. 2334–2360, 3rd Quart. 2019. https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862

[2] B. Galkin, J. Kibilda, L. A. DaSilva, “A stochastic model for UAV networks positioned above demand hotspots in urban environments”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 68, No. 7, pp. 6985– 6996, July 2019. https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2916429

[3] H. Jia, J. Zhong, M. N. Janardhanan, G. Chen, “Ergodic capacity analysis for FSO communications with UAV-equipped IRS in the presence of pointing error”, in Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT), Nanning, China, pp. 949–954, 28–31 Oct. 2020. https://doi.org/10.1109/ICCT50939.2020.9295740

[4] W. U. Khan, E. Lagunas, Z. Ali, M. A. Javed, M. Ahmed, S. Chatzinotas, B. Ottersten, P. Popovski, “Opportunities for physical layer security in UAV communication enhanced with intelligent reflective surfaces”, IEEE Wireless Communications, Vol. 29, No. 6, pp. 22-28, Dec. 2022. https://doi.org/10.1109/MWC.001.2200125

[5] Y. Qin, M. A. Kishk, M. -S. Alouini, “Performance Evaluation of UAV-Enabled Cellular Networks with Battery-Limited Drones”, in IEEE Communications Letters, Vol. 24, No. 12, pp. 2664-2668, Dec. 2020. https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3013286

[6] B. Praveen Kumar, U. K. Kommuri, “Review on 5G Small Cell Base Station Antennas: Design Challenges and Technologies”, in IEEE Access, Vol. 12, pp. 85899-85928, 2024. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3415640

[7] A. L. Rezaabad, H. Beyranvand, J. A. Salehi, M. Maier, "Ultradense 5G small cell deployment for fiber and wireless backhaul-aware infrastructures", IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 67, No. 12, pp. 12231–12243, Dec. 2018. https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2875114

[8] M. H. Alsharif, R. Nordin, M. M. Shakir, A. M. Ramly, "Small cells integration with the macro-cell under LTE cellular networks and potential extension for 5G", J. Electr. Eng. Technol., Vol. 14, No. 6, pp. 2455–2465, Nov. 2019. https://doi.org/10.1007/s42835-019-00173-2

[9] D. Muirhead, M. A. Imran, K. Arshad, "A survey of the challenges, opportunities and use of multiple antennas in current and future 5G small cell base stations", IEEE Access, Vol. 4, pp. 2952–2964, 2016. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2569483

[10] A. Asadi, Q. Wang, V. Mancuso, "A survey on device-to-device communication in cellular networks", IEEE Commun. Surveys Tuts., Vol. 16, No. 4, pp. 1801–1819, 4th Quart., 2014. https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2319555

[11] M. Alzenad, H. Yanikomeroglu, "Coverage and rate analysis for vertical heterogeneous networks (VHetNets)", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 18, No. 12, pp. 5643–5657, Dec. 2019. https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2938168

[12] B. Saha, E. Koshimoto, C. C. Quach, E. F. Hogge, T. H. Strom, B. L. Hill, S. L. Vazquez, K.Goebel, "Battery health management system for electric UAVs", in Proc., Aerospace Conference, pp. 1–9, Mar. 2011. https://doi.org/10.1109/AERO.2011.5747587

[13] Y. Zeng, R. Zhang, "Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 16, No. 6, pp. 3747–3760, June 2017. https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2688328

[14] M. Alzenad, A. El-Keyi, F. Lagum, H. Yanikomeroglu, "3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage", IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 6, No. 4, pp. 434–437, Aug. 2017. https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2700840

[15] M. A. Kishk, A. Bader, M. -S. Alouini, "On the 3-D Placement of Airborne Base Stations Using Tethered UAVs",in IEEE Transactions on Communications, Vol. 68, No. 8, pp. 5202-5215, Aug. 2020. https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2993885

[16] R. I. Bor-Yaliniz, A. El-Keyi, H. Yanikomeroglu, "Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks", in 2016 IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC), May 2016. https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7510820

[17] M. A. Ali, A. Jamalipour, "UAV-Aided Cellular Operation by User Offloading", in IEEE Internet of Things Journal, Vol. 8, No. 12, pp. 9855-9864, 15 June 2021. https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3015479

[18] S. Mahama, D. K. P. Asiedu, K. -J. Lee, "Simultaneous Wireless Information and Power Transfer for Cooperative Relay Networks with Battery", in IEEE Access, Vol. 5, pp. 13171-13178, 2017. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2724638

[19] F. H. Panahi, F. H. Panahi, "Cost-Aware UAV-Enabled Computation Offloading for Green Internet of Things", in IEEE Transactions on Green Communications and Networking, Vol. 10, pp. 366-375, 2026. https://doi.org/10.1109/TGCN.2025.3580453

[20] F. H. Panahi, F. H. Panahi, "Intelligent UAV-Based Mobile Offloading: A Multi-Objective Optimization Approach", in IEEE Transactions on Green Communications and Networking, Vol. 9, No. 3, pp. 900-909, Sept. 2025. https://doi.org/10.1109/TGCN.2024.3524003

[21] F. H. Panahi, F. H. Panahi, T. Ohtsuki, "Intelligent Cellular Offloading With VLC-Enabled Unmanned Aerial Vehicles", in IEEE Internet of Things Journal, Vol. 10, No. 20, pp. 17718-17733, 15 Oct. 2023. https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3279925

[22] K. Zeng, X. Li, T. Shen, "Energy-Stabilized Computing Offloading Algorithm for UAVs With Energy Harvesting", in IEEE Internet of Things Journal, Vol. 11, No. 4, pp. 6020-6031, 15 Feb. 2024. https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3309136

[23] M. El-Emary, D. Naboulsi, R. Stanica, "Energy-Efficient and Resilient Task Offloading in UAV-Assisted MEC Systems", in IEEE Open Journal of Vehicular Technology, Vol. 6, pp. 2236-2254, 2025. https://doi.org/10.1109/OJVT.2025.3598154

[24] Z. Yu, Z. Zhang, S. Zeadally, B. Shen, X. Pei, "Energy-Efficient Computing Offloading with Trajectory Optimization and Resource Allocation in UAV-Aided Industrial IoT", in IEEE Internet of Things Journal, Vol. 12, No. 17, pp. 34780-34792, 1 Sept. 2025. https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3582091

[25] Qualcomm Technologies, LTE Unmanned Aircraft Systems, Trial Report v1.0.1, Qualcomm Technologies, Inc., May 2017. Available at:

https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/05/qualcomm-technologies-releases-lte-drone-trial-results

[26] Y. Qin, M. A. Kishk, M. -S. Alouini, “On the Influence of Charging Stations Spatial Distribution on Aerial Wireless Networks”, in IEEE Transactions on Green Communications and Networking, Vol. 5, No. 3, pp. 1395-1409, Sept. 2021. https://doi.org/10.1109/TGCN.2021.3085105

[27] F. H. Panahi, F. H. Panahi, “An Intelligent Energy-Efficient Firefighting Strategy in Mobile WSNs”, Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 13, No. 3, pp. 37-54, 2022. https://doi.org/10.22108/isee.2021.124683.1406 [In Persian]

[28] X. Dai, B. Duo, X. Yuan, M. D. Renzo, “Energy-Efficient UAV Communications in the Presence Wind: 3D Modeling and Trajectory Design”, in IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 23, No. 3, pp. 1840-1854, Mar. 2024. https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3292290

[1] Unmanned Aerial Vehicle
[2] Flying Base Stations
[3] Terrestrial Base Stations
[4] Line of Sight
[5] Aerial Base Station
[6] Data Offloading
[7] Small-Cell Base Stations
[8] Device-to-Device Communication
[9] Qualcomm
[10] Fading
[11] Downlink