Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 3 – Autumn 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Optimization of Base Station Sleep Strategy and Resource Allocation in Cellular Wireless Networks Using the Artificial Single-Cell Optimization Algorithm

Hamidreza Firouzianfar [1], *Ph.D.Student*, Mohammad Tolou Askari [* 2], *Associate Professor*, Javad Safaei Koochaksaraei [1], Assistant *Professor*, Mahmoud Samiei Moghaddam [3], Assistant *Professor*, Vahid Ghods [1], *Associate Professor*

[1] Department of Electrical Engineering, Se.C., Islamic Azad University, Semnan, Iran.
[2] Department of Electrical Engineering, Se.C., Islamic Azad University, Semnan, Iran.
m.askari1980@iau.ac.ir (Corresponding author)
[3] Department of Electrical Engineering, Da.C., Islamic Azad University, Damghan, Iran.

Abstract:
The increasing densification of small base stations in heterogeneous cellular networks, while improving coverage and capacity, simultaneously leads to a significant rise in overall network energy consumption. In this paper, a bi-level optimization framework for energy management in cellular networks is proposed, in which decisions on small base station sleep strategies and radio resource allocation are jointly optimized while explicitly considering users' quality of service (QoS). At the upper level of the proposed framework, the active, light-sleep, and deep-sleep states of small base stations are modeled by accounting for switching costs and wake-up delays, with the objective of minimizing total network energy consumption subject to QoS constraints. At the lower level, the power and subchannel allocation problem is solved to strike a balance among data rate, energy consumption, and user fairness. The overall problem is formulated as a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) problem and is solved using the Artificial Single-Cell Optimization Algorithm (ACA), which is capable of jointly optimizing discrete and continuous variables with satisfactory convergence behavior. Simulation results based on standard 3GPP scenarios in MATLAB software demonstrate that, compared with benchmark algorithms such as PSO, GA, and DQN, the proposed method achieves a substantial reduction in energy consumption without noticeable degradation in QoS or user fairness. In particular, by appropriately tuning the trade-off parameters, the proposed framework is able to achieve more than 40% energy savings while maintaining a high user satisfaction rate, and it exhibits effective adaptive behavior in response to dynamic variations in network traffic.

Keywords: Heterogeneous cellular networks, base station sleep strategy, small base stations, radio resource allocation, power and subchannel allocation.

Received: 16 Aug. 2025
Revised: 11 Oct. 2025
Accepted: 25 Oct. 2025

*** Corresponding Author:** Dr. Mohammad Tolou Askari

Citation: H. Firouzianfar, M. Tolou Askari, J. Safaei Koochaksaraei, M. Samiei Moghaddam, V. Ghods, "Instructions and Formatting Rules for Authors of Journal of Novel Researches on Smart Power Systems", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 3, pp. 31-46, November 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.555]

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی استراتژی خواب ایستگاه‌های پایه و تخصیص منابع در شبکه‌های بی‌سیم سلولی با الگوریتم بهینه‌سازی تک‌یاخته‌ای مصنوعی

حمیدرضا فیروزیان فر[۱]، دانشجوی دکترا، محمد طلوع عسکری[۲]، دانشیار، جواد صفایی کوچکسرایی[۱]، استادیار، محمود سمیعی مقدم[۳]، استادیار، وحید قدس[۱]، دانشیار

۱- گروه برق، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
۲- گروه برق، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
m.askari1980@iau.ac.ir
۳- گروه برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

چکیده: افزایش چگالی ایستگاه‌های پایه کوچک در شبکه‌های سلولی ناهمگن، اگرچه موجب بهبود پوشش و ظرفیت می‌شود، اما به‌طور هم‌زمان مصرف انرژی شبکه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. در این مقاله، یک چارچوب بهینه‌سازی دوسطحی برای مدیریت انرژی شبکه‌های سلولی ارائه می‌شود که در آن، تصمیمات مربوط به استراتژی خواب ایستگاه‌های پایه کوچک و تخصیص منابع رادیویی به‌صورت هماهنگ و با درنظرگرفتن کیفیت سرویس کاربران اتخاذ می‌گردد. در سطح بالای چارچوب پیشنهادی، حالت‌های فعال، خواب سبک و خواب عمیق ایستگاه‌های پایه کوچک با لحاظ‌کردن هزینه سوئیچینگ و تأخیر بیداری مدل‌سازی شده و هدف، کمینه‌سازی مصرف کل انرژی شبکه تحت قیود کیفیت سرویس است. در سطح پایین، مسئله تخصیص توان و زیرکانال با هدف ایجاد توازن میان نرخ داده، مصرف انرژی و انصاف کاربران حل می‌شود. مسئله کلی به‌صورت یک مسئله ترکیبی-صحیح غیرخطی (MINLP) فرموله شده و برای حل آن از الگوریتم بهینه‌سازی تک‌یاخته‌ای مصنوعی (ACA) استفاده می‌شود که قادر است به‌طور هم‌زمان متغیرهای گسسته و پیوسته را با همگرایی مناسب بهینه نماید. نتایج شبیه‌سازی مبتنی بر سناریوهای استاندارد GPP۳ در نرم‌افزار MATLAB نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های مرجع نظیر PSO، GA و DQN، کاهش معناداری در مصرف انرژی را بدون افت محسوس در کیفیت سرویس و انصاف کاربران فراهم می‌کند. به‌طور خاص، با تنظیم مناسب پارامترهای مصالحه، چارچوب پیشنهادی قادر به دستیابی به بیش از ۴۰٪ صرفه‌جویی انرژی همراه با نرخ رضایت بالای کاربران بوده و رفتار تطبیقی مؤثری در برابر تغییرات ترافیک شبکه از خود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: شبکه‌های سلولی ناهمگن، استراتژی خواب ایستگاه پایه، ایستگاه پایه کوچک، تخصیص منابع رادیویی، تخصیص توان و زیرکانال.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۲۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۳

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر محمد طلوع عسکری
نشانی نویسنده مسئول: گروه برق، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3 - Autumn 2025

۱- مقدمه

افزایش روزافزون تقاضا برای خدمات بی‌سیم و رشد سریع تعداد کاربران، منجر به استقرار گسترده ایستگاه‌های پایه کوچک در کنار ایستگاه‌های پایه ماکرو شده است. اگرچه این رویکرد نقش مؤثری در بهبود پوشش، افزایش ظرفیت شبکه و ارتقای کیفیت سرویس دارد، اما در مقابل موجب افزایش قابل توجه مصرف انرژی شبکه‌های سلولی می‌شود. بخش عمده‌ای از این مصرف انرژی مربوط به ایستگاه‌های پایه است که حتی در ساعات کم‌ترافیک نیز به‌صورت فعال باقی می‌مانند. از این‌رو، کاهش مصرف انرژی شبکه‌های سلولی، بدون ایجاد افت محسوس در کیفیت سرویس کاربران، به یکی از چالش‌های اساسی در طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های نسل جدید تبدیل شده است. در این میان، به‌کارگیری استراتژی‌های خواب برای ایستگاه‌های پایه کوچک به‌عنوان یک راهکار مؤثر مطرح شده است، اما پیاده‌سازی کارآمد آن نیازمند تصمیم‌گیری هوشمندانه و هماهنگ با تخصیص منابع رادیویی است.

با وجود اهمیت موضوع، تصمیم‌گیری در خصوص زمان و نحوه خواب یا بیداری ایستگاه‌های پایه کوچک، به‌ویژه در حضور ترافیک متغیر زمانی و تداخل بین سلولی، مسئله‌ای پیچیده و چندبعدی محسوب می‌شود. از یک سو، خاموش یا نیمه‌خاموش کردن ایستگاه‌های پایه می‌تواند مصرف انرژی را کاهش دهد، و از سوی دیگر، ممکن است منجر به افزایش تداخل، کاهش نرخ داده کاربران و افت کیفیت سرویس شود. علاوه بر این، نادیده گرفتن هزینه سوئیچینگ حالت‌ها و تأخیر بیداری ایستگاه‌های پایه می‌تولند موجب تصمیم‌گیری‌های غیرواقع‌بینانه و کاهش کارایی عملی روش‌های پیشنهادی گردد. بنابراین، طراحی چارچوبی که بتواند به‌صورت همزمان مصرف انرژی، کیفیت سرویس، انصاف کاربران و پویایی ترافیک شبکه را در نظر بگیرد، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی مدیریت انرژی در شبکه‌های سلولی پرداخته‌اند. در مطالعه [۱]، راهکاری مبتنی بر خاموش‌سازی ایستگاه‌های پایه در شرایط بار کم ارائه شده است که اگرچه منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود، اما کیفیت سرویس کاربران را به‌طور کامل تضمین نمی‌کند. در مطالعه [۲]، تأثیر خواب ایستگاه‌های پایه کوچک بر پوشش شبکه بررسی شده و نشان داده شده است که تصمیمات ایستا کارایی محدودی دارند. در مطالعه [۳]، یک مدل بهینه‌سازی برای کاهش مصرف انرژی ارائه شده که هزینه سوئیچینگ حالت‌ها در آن لحاظ نشده است. در مطالعه [۴]، تخصیص منابع رادیویی با فرض وضعیت ثابت ایستگاه‌های پایه بررسی شده و تعامل آن با استراتژی خواب نادیده گرفته شده است. در مطالعه [۵]، کیفیت سرویس کاربران به‌صورت میانگین بررسی شده و انصاف کاربران مورد توجه قرار نگرفته است. در مطالعه [۶]، یک چارچوب تک‌سطحی برای مدیریت انرژی پیشنهاد شده که توانایی تطبیق با تغییرات زمانی ترافیک را ندارد. در مطالعه [۷]، خواب ایستگاه‌های پایه بدون در نظر گرفتن تأخیر بیداری مدل‌سازی شده است. در مطالعه [۸]، تمرکز اصلی بر کاهش مصرف انرژی بوده و اثرات آن بر نرخ داده کاربران به‌صورت محدود بررسی شده است. در مطالعه [۹]، تداخل بین سلولی به‌صورت ساده‌شده مدل شده است. در مطالعه [۱۰]، روش‌های یادگیری برای مدیریت انرژی به‌کار گرفته شده‌اند، اما پیچیدگی محاسباتی بالایی دارند. در مطالعه [۱۱]، تصمیمات خواب ایستگاه‌های پایه به‌صورت غیرهماهنگ اتخاذ شده است. در مطالعه [۱۲]، تنها یک حالت خواب برای ایستگاه‌های پایه در نظر گرفته شده است. در مطالعه [۱۳]، تأثیر تغییرات بار زمانی به‌صورت دقیق بررسی نشده است. در مطالعه [۱۴]، مسئله به‌صورت جداگانه برای مصرف انرژی و تخصیص منابع حل شده است. در مطالعه [۱۵]، تضمین حداقل کیفیت سرویس برای همه کاربران مدنظر قرار نگرفته است. در مطالعه [۱۶]، مدل ارائه‌شده مقیاس‌پذیری محدودی دارد. در مطالعه [۱۷]، تعامل بین ایستگاه پایه ماکرو و ایستگاه‌های پایه کوچک ساده‌سازی شده است. در مطالعه [۱۸]، هزینه‌های عملیاتی ناشی از تغییر حالت ایستگاه‌ها نادیده گرفته شده است. در مطالعه [۱۹]، نتایج صرفاً برای سناریوهای خاص گزارش شده است. در مطالعه [۲۰]، رفتار تطبیقی شبکه در بازه‌های زمانی طولانی بررسی نشده است.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه تلاش‌های ارزشمندی در زمینه کاهش مصرف انرژی شبکه‌های سلولی انجام شده است، اما همچنان شکاف‌های پژوهشی قابل توجهی وجود دارد. به‌طور مشخص، اغلب پژوهش‌ها یا بر استراتژی خواب ایستگاه‌های پایه تمرکز داشته‌اند یا بر تخصیص منابع رادیویی، و به تعامل دوسویه این دو تصمیم اساسی توجه کافی نشده است. همچنین، در بسیاری از مطالعات، هزینه و تأخیر ناشی از بیدار شدن ایستگاه‌های پایه، که نقش مهمی در تجربه کاربران دارد، به‌صورت صریح مدل‌سازی نشده است. علاوه بر این، رویکردهای تک‌سطحی توانایی محدودی در مدیریت همزمان متغیرهای گسسته و پیوسته داشته و در مواجهه با تغییرات پویای ترافیک، کارایی خود را از دست می‌دهند.

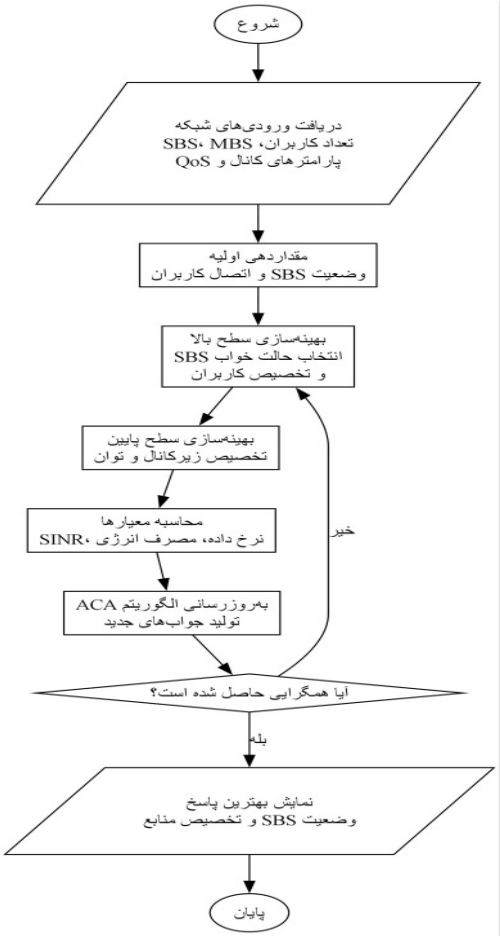
بر این اساس، انگیزه اصلی این پژوهش، ارائه یک چارچوب جامع و واقع‌بینانه برای مدیریت انرژی در شبکه‌های سلولی ناهمگن است که بتواند تصمیمات مربوط به خواب ایستگاه‌های پایه کوچک و تخصیص منابع رادیویی را به‌صورت هماهنگ و تطبیقی اتخاذ کند. نوآوری اصلی این تحقیق، ارائه یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی است که در آن، حالت‌های مختلف ایستگاه‌های پایه کوچک به همراه هزینه سوئیچینگ و تأخیر بیداری به‌صورت صریح در نظر گرفته شده و در سطح پایین، تخصیص منابع با هدف ایجاد توازن میان مصرف انرژی، کیفیت سرویس و انصاف کاربران انجام می‌شود. علاوه بر این، استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری پیشرفته برای حل همزمان متغیرهای گسسته و پیوسته، امکان دستیابی به راه‌حل‌های کارآمد با پیچیدگی محاسباتی مناسب را فراهم می‌سازد و عملکرد شبکه را در شرایط مختلف بار ترافیکی به‌طور قابل توجهی بهبود می‌دهد.

در شکل (۱) روند کلی حل مسئله بهینه‌سازی همزمان استراتژی خواب ایستگاه‌های پایه کوچک و تخصیص منابع رادیویی در شبکه ناهمگن نشان داده شده است. فرآیند با دریافت پارامترهای شبکه شامل اطلاعات کاربران، ایستگاه‌های پایه، شرایط کانال و قیود کیفیت سرویس آغاز می‌شود و پس از مقداردهی اولیه وضعیت ایستگاه‌ها و اتصال کاربران، بهینه‌سازی در دو سطح

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3 - Autumn 2025

انجام می‌گیرد. در سطح بالا، حالت عملیاتی هر ایستگاه پایه (فعال، خواب سبک یا خواب عمیق) و نحوه انتساب کاربران تعیین می‌شود و سپس در سطح پایین، تخصیص زیرکانال و توان ارسال با هدف بهبود نرخ داده و کاهش مصرف انرژی انجام می‌پذیرد. پس از محاسبه شاخص‌هایی نظیرSINR ، نرخ انتقال داده، مصرف انرژی و معیار انصاف، الگوریتم بهینه‌سازی تک‌یاخته‌ای مصنوعی (ACA) راه‌حل‌ها را به‌روزرسانی کرده و فرآیند تا رسیدن به شرط همگرایی تکرار می‌شود. در نهایت، بهترین ترکیب وضعیت ایستگاه‌ها و تخصیص منابع به عنوان خروجی نهایی ارائه می‌گردد.



شکل (۱): فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی دوسطحی استراتژی خواب ایستگاه‌های پایه و تخصیص منابع با استفاده از الگوریتم ACA

Figure (1): Flowchart of the Bi-Level Optimization Algorithm for Base Station Sleep Strategy and Resource Allocation Using the ACA Algorithm

در بخش بعدی مقاله مدل‌سازی پیشنهادی ارائه شده است، در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل نتایج ارائه شده است. در بخش نهایی نتیجه‌گیری مقاله و پیشنهادات ارائه می‌شود.

۲- مدل‌سازی پیشنهادی

در این بخش، مدل‌سازی سطح بالای مسئله، که هدف آن تعیین استراتژی خواب و بیداری ایستگاه‌های پایه کوچک در طول افق زمانی است، به‌صورت گام‌به‌گام توضیح داده می‌شود. تمرکز این سطح بر تصمیم‌های کلان شبکه بوده و از دید یک ناظر مرکزی انجام می‌شود که به اطلاعات کلی بار، کاربران و وضعیت ایستگاه‌ها دسترسی دارد. در جدول (۱) واژه نامه مربوط به مدل‌سازی شامل مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها نشان داده شده است.

معادله (۱) تابع هدف سطح بالا را معرفی می‌کند. در این تابع، هدف کمینه‌سازی مجموع سه مؤلفه اصلی است: مصرف کل انرژی شبکه، هزینه‌های ناشی از تغییر حالت ایستگاه‌های پایه کوچک، و جریمه نقض کیفیت سرویس کاربران. ضرایب وزنی بتا و گاما نقش تنظیم‌کننده دارند و اهمیت نسبی هزینه‌های سوئیچینگ و کیفیت سرویس را نسبت به مصرف انرژی مشخص می‌کنند. به این ترتیب، مسئله به‌صورت یک بهینه‌سازی چندمعیاره ولی با قالب یک تابع هدف تجمیع‌شده فرموله می‌شود. معادله (۲) مصرف کل انرژی شبکه را تعریف می‌کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3 - Autumn 2025

Table (1): Nomenclature

جدول (۱): واژه‌نامه

مجموعه‌ها و شاخص‌ها	
$\mathcal{M}$	مجموعه ایستگاه‌های پایه کوچک (SBS)، $m \in \mathcal{M}$، $\|\mathcal{M}\| = M$
$\mathcal{B}$	مجموعه ایستگاه‌های پایه ماکرو (MBS)، $b \in \mathcal{B}$، $\|\mathcal{B}\| = B$
$\mathcal{K}$	مجموعه کل کاربران (UE)، $k \in \mathcal{K}$، $\|\mathcal{K}\| = K$
$\mathcal{K}_m$	مجموعه کاربران مرتبط به m SBS
$\mathcal{K}_b$	مجموعه کاربران مرتبط به b MBS
$\mathcal{N}$	مجموعه زیرکانال‌های OFDMA، $n \in \mathcal{N}$، $\|\mathcal{N}\| = N$
$\mathcal{T}$	افق زمانی بهینه‌سازی، $t \in \mathcal{T}$، $\|\mathcal{T}\| = T$
$\mathcal{S}$	فضای حالت خواب، $\mathcal{S} = \{۰,۱,۲\}$ (خواب عمیق، خواب سبک، فعال)
پارامترها	
$P_m^{\max}$	حداکثر توان انتقال m SBS (وات)
$P_b^{\max}$	حداکثر توان انتقال b MBS (وات)
$P_m^{s.}$	مصرف توان m SBS در حالت خواب عمیق (وات)
$P_m^{s۱}$	مصرف توان m SBS در حالت خواب سبک (وات)
P_m^{act}	مصرف توان ثابت m SBS در حالت فعال (وات)
α_m	ضریب شیب مصرف توان m SBS (وابسته به بار)
η_m^{PA}	بازده تقویت‌کننده توان m SBS
$\tau_{m,۰\to۲}$	تأخیر بیداری از خواب عمیق به فعال برای m SBS (ms)
$\tau_{m,۱\to۲}$	تأخیر بیداری از خواب سبک به فعال برای m SBS (ms)
$h_{m,k,n}^t$	بهره کانال بین m SBS و کاربر k در زیرکانال n و زمان t
$g_{b,k,n}^t$	بهره کانال بین b MBS و کاربر k در زیرکانال n و زمان t
$\sigma^۲$	توان نویز گوسین سفید (وات/هرتز)
W	پهنای باند هر زیرکانال (هرتز)
$R_k^{\min}$	حداقل نرخ داده مورد نیاز کاربر k (bps)
$D_k^{\max}$	حداکثر تأخیر قابل قبول برای کاربر k (ms)
λ_m	هزینه عملیاتی واحد انرژی m SBS (ریال/ژول)
μ_m	هزینه سوئیچینگ حالت m SBS (ریال/سوئیچ)
β	وزن تعادل بین انرژی و QoS
$\Gamma_k^{\min}$	حداقل SINR قابل قبول برای کاربر k
$\rho_{m,n}^{\max}$	ظرفیت حداکثر تداخل قابل تحمل در زیرکانال n از m SBS
δ_t	مدت زمان بازه t (ثانیه)
C_m^{hw}	هزینه سایش سخت‌افزاری سوئیچینگ برای m SBS
ξ_k	اولویت سرویس کاربر k
متغیرهای تصمیم	
z_m^t	حالت m SBS در بازه t
$x_{k,n}^{m,t}$	تخصیص زیرکانال n به کاربر k از m SBS در بازه t
$x_{k,n}^{b,t}$	تخصیص زیرکانال n به کاربر k از b MBS در بازه t
$p_{k,n}^{m,t}$	توان ارسال m SBS به کاربر k در زیرکانال n و بازه t
$p_{k,n}^{b,t}$	توان ارسال b MBS به کاربر k در زیرکانال n و بازه t
$a_{k,m}^t$	انتساب کاربر k به m SBS در بازه t
$a_{k,b}^t$	انتساب کاربر k به b MBS در بازه t
ϕ_m^t	متغیر کمکی تشخیص تغییر حالت m SBS در بازه t

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

این مقدار با جمع‌زدن مصرف انرژی تمام ایستگاه‌های پایه کوچک و ایستگاه‌های پایه ماکرو در تمامی بازه‌های زمانی به‌دست می‌آید. ضریب دلتا برای هر بازه زمانی، طول یا وزن آن بازه را در نظر می‌گیرد. در این بیان، مصرف انرژی ایستگاه‌های ماکرو به‌صورت یک توان مداری ثابت مدل شده است، در حالی که مصرف ایستگاه‌های کوچک به وضعیت عملیاتی آن‌ها وابسته است.معادله (۳) توان مصرفی یک ایستگاه پایه کوچک را به‌صورت تابعی از حالت آن تشریح می‌کند. اگر ایستگاه در حالت فعال باشد، مصرف انرژی شامل توان مداری فعال و توان مصرفی تقویت‌کننده توان است که متناسب با مجموع توان‌های ارسالی به کاربران و زیرکانال‌ها در نظر گرفته می‌شود. اگر ایستگاه در خواب سبک یا خواب عمیق قرار داشته باشد، به‌ترتیب از مقادیر ثابت و کمتری برای توان مصرفی استفاده می‌شود. این تفکیک امکان مدل‌سازی دقیق اثر حالت‌های مختلف خواب بر مصرف انرژی را فراهم می‌کند. معادله (۴) هزینه‌های سوئیچینگ را بیان می‌کند. این هزینه شامل دو بخش است: بخش اول، هزینه نرم تغییر حالت است که متناسب با تعداد تغییر وضعیت ایستگاه‌ها در طول زمان محاسبه می‌شود؛ بخش دوم، هزینه سخت‌افزاری است که فقط در حالتی اعمال می‌شود که ایستگاه از خواب عمیق مستقیماً به حالت فعال منتقل شود. این مؤلفه به‌منظور در نظر گرفتن استهلاک تجهیزات و هزینه‌های فیزیکی بیدارسازی در مدل گنجانده شده است. معادله (۵) جریمه کیفیت سرویس را تعریف می‌کند. در این رابطه، اگر نرخ داده کاربر کمتر از حداقل نرخ موردنیاز باشد، میزان کمبود به‌صورت مربعی جریمه می‌شود. وزن هر کاربر در این جریمه با ضریب اهمیت او مشخص می‌شود. این ساختار باعث می‌شود افت‌های شدید QoS به‌شدت جریمه شوند و مدل به سمت حفظ کیفیت سرویس کاربران حساس‌تر شود. محدودیت‌های سطح بالا با تشخیص تغییر حالت آغاز می‌شوند. معادله (۶) تضمین می‌کند که متغیر کمکی تغییر حالت تنها زمانی فعال شود که اختلاف معناداری بین وضعیت فعلی و قبلی ایستگاه وجود داشته باشد. به بیان دیگر، هرگونه تغییر میان حالت‌های خواب و فعال باید توسط این متغیر ثبت شود. معادله (۷) نیز ماهیت باینری این متغیر را مشخص می‌کند. معادله (۸) محدودیت حداقل مدت ماندن در هر حالت را اعمال می‌کند. این قید از نوسانات سریع و غیرواقعی بین حالت‌های مختلف جلوگیری می‌کند و تضمین می‌کند که پس از هر تغییر حالت، ایستگاه برای حداقل تعداد مشخصی از بازه‌های زمانی در همان حالت باقی بماند. این ویژگی از دید عملیاتی اهمیت زیادی دارد، زیرا تغییرات مکرر می‌توانند هم از نظر انرژی و هم از نظر پایداری شبکه مضر باشند. معادله (۹) انتساب یکتای کاربران را تضمین می‌کند. بر اساس این قید، هر کاربر در هر بازه زمانی باید دقیقاً به یک ایستگاه، چه ایستگاه کوچک و چه ایستگاه ماکرو، متصل باشد. این شرط از ابهام در ارائه سرویس جلوگیری می‌کند. معادله (۱۰) بیان می‌کند که انتساب کاربر به یک ایستگاه پایه کوچک تنها در صورتی مجاز است که آن ایستگاه در حالت فعال باشد. به این ترتیب، کاربران نمی‌توانند به ایستگاه‌هایی که در خواب سبک یا عمیق قرار دارند متصل شوند. معادله (۱۱) محدودیت ظرفیت هر ایستگاه پایه کوچک را اعمال می‌کند. این قید حداکثر تعداد کاربرانی را که می‌توانند هم‌زمان به یک ایستگاه فعال متصل شوند، محدود می‌سازد و در صورت غیرفعال بودن ایستگاه، به‌طور خودکار انتساب کاربر را به صفر می‌رساند. معادله (۱۲) اثر تأخیر بیدارسازی را بر کیفیت سرویس کاربران در نظر می‌گیرد. اگر یک ایستگاه از حالت خواب به حالت فعال منتقل شود، زمان لازم برای بیدارسازی آن باید در بودجه تأخیر مجاز کاربران لحاظ شود. این قید ارتباط مستقیمی میان تصمیم‌های انرژی‌محور و الزامات QoS ایجاد می‌کند. معادله (۱۳) حداقل پوشش کیفیت سرویس در سطح شبکه را تضمین می‌کند. بر اساس این قید، در هر بازه زمانی باید حداقل نسبت مشخصی از کاربران، با توجه به وزن اهمیت آن‌ها، به نرخ داده موردنیاز خود دست یابند. این شرط مانع از بهبود مصرف انرژی به قیمت نارضایتی گسترده کاربران می‌شود. معادله (۱۴) تعداد ایستگاه‌های پایه کوچک فعال به‌صورت هم‌زمان را محدود می‌کند. این محدودیت با هدف کنترل تداخل کلی شبکه و همچنین مدیریت مصرف انرژی اعمال شده است. معادله (۱۵) توالی مجاز تغییر حالت‌ها را مشخص می‌کند. طبق این قید، اگر زمان لازم برای گذار از خواب عمیق به حالت فعال بیش از طول یک بازه زمانی باشد، گذار مستقیم مجاز نیست و ایستگاه باید ابتدا وارد خواب سبک شود. این محدودیت رفتار فیزیکی واقعی تجهیزات را منعکس می‌کند. معادله (۱۶) همان محدودیت قبلی را به‌شکل خطی و با استفاده از متغیر باینری کمکی بازنویسی می‌کند تا قابل استفاده در چارچوب بهینه‌سازی خطی یا عدد صحیح باشد. معادله (۱۷) تضمین می‌کند که ایستگاه‌های پایه ماکرو همواره فعال بوده و حداقل تعداد مشخصی از آن‌ها در هر بازه زمانی در دسترس باشند. این قید نقش لایه پشتیبان شبکه را برای MBSها تثبیت می‌کند. معادله (۱۸) محدودیت انتقال بار را بیان می‌کند. اگر یک ایستگاه پایه کوچک از حالت فعال خارج شود، کاربرانی که قبلاً به آن متصل بوده‌اند باید در بازه بعدی به ایستگاه‌های دیگر یا به ایستگاه‌های ماکرو منتقل شوند. این قید پیوستگی سرویس کاربران را تضمین می‌کند. معادله (۱۹) تعادل بار در ایستگاه‌های ماکرو را برقرار می‌سازد. با این قید، تعداد کاربرانی که پس از خواب ایستگاه‌های کوچک به هر MBS منتقل می‌شوند، از ظرفیت مجاز آن ایستگاه تجاوز نمی‌کند. در نهایت، معادله (۲۰) دامنه متغیر حالت ایستگاه‌های پایه کوچک را مشخص می‌کند و سه حالت مجاز خواب عمیق، خواب سبک و فعال را به‌صورت صریح در مدل تعریف می‌کند. این تعریف پایه‌ای برای تمام قیود و روابط پیشین فراهم می‌آورد

$$\min_{z_m^t, a_{k,m}^t, a_{k,b}^t, \phi_m^t} \mathcal{F}_{\mathrm{UL}} = \mathcal{E}_{\mathrm{total}} + \beta \cdot \mathcal{C}_{\mathrm{switch}} + \gamma \cdot \mathcal{P}_{\mathrm{QoS}} \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_{\mathrm{total}} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \delta_t \left[\sum_{m \in \mathcal{M}} \Pi_m^t(z_m^t) + \sum_{b \in \mathcal{B}} P_b^{\mathrm{circ}} \right] \quad (2)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3 - Autumn 2025

$$\Pi_m^t(z_m^t) = \mathbf{1}[z_m^t = ۲]\left(P_m^{\text{act}} + \frac{\alpha_m}{\eta_m^{PA}} \sum_{k\in\mathcal{K}_m} \sum_{n\in\mathcal{N}} p_{k,n}^{m,t}\right) + \mathbf{1}[z_m^t = ۱]P_m^{S_۱} + \mathbf{1}[z_m^t = ۰]P_m^{S_۰} \quad (۳)$$

$$\mathcal{C}_{\text{switch}} = \sum_{t\in\mathcal{T}\setminus\{۱\}} \sum_{m\in\mathcal{M}} \mu_m \phi_m^t + C_m^{\text{hw}} \cdot \mathbf{1}[z_m^{t-۱} = ۰, z_m^t = ۲] \quad (۴)$$

$$\mathcal{P}_{\text{QoS}} = \sum_{t\in\mathcal{T}} \sum_{k\in\mathcal{K}} \xi_k \cdot \max(۰, R_k^{\min} - R_k^t)^۲ \quad (۵)$$

$$\phi_m^t \geq \frac{|z_m^t - z_m^{t-۱}|}{۲}, \forall m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T} \setminus \{۱\} \quad (۶)$$

$$\phi_m^t \in \{۰,۱\}, \forall m, t \quad (۷)$$

$$\sum_{\tau=t}^{\min(t+T_m^{\text{dwell}}-۱,T)} \mathbf{1}[z_m^\tau = z_m^t] \geq T_m^{\text{dwell}} \cdot \mathbf{1}[\phi_m^t = ۱], \forall m, t \quad (۸)$$

$$\sum_{m\in\mathcal{M}} a_{k,m}^t + \sum_{b\in\mathcal{B}} a_{k,b}^t = ۱, \forall k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T} \quad (۹)$$

$$a_{k,m}^t \leq \frac{z_m^t}{۲}, \forall k \in \mathcal{K}, m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T} \quad (۱۰)$$

$$\sum_{k\in\mathcal{K}} a_{k,m}^t \leq K_m^{\max} \cdot \mathbf{1}[z_m^t = ۲], \forall m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T} \quad (۱۱)$$

$$D_k^{\max} \geq \tau_{m,s\to۲} \cdot \mathbf{1}[z_m^{t-۱} = s, z_m^t = ۲, a_{k,m}^t = ۱], \forall k, m, s \in \{۰,۱\}, t \quad (۱۲)$$

$$\sum_{k\in\mathcal{K}} \xi_k \cdot \mathbf{1}[R_k^t \geq R_k^{\min}] \geq \Omega^{\min} \cdot \sum_{k\in\mathcal{K}} \xi_k, \forall t \in \mathcal{T} \quad (۱۳)$$

$$\sum_{m\in\mathcal{M}} \mathbf{1}[z_m^t = ۲] \leq M_{\text{on}}^{\max}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (۱۴)$$

$$z_m^t \neq ۲ \cdot \mathbf{1}[z_m^{t-۱} = ۰ \text{ و } \tau_{m,۰\to۲} > \delta_t], \forall m, t \quad (۱۵)$$

$$z_m^t \leq ۲ - ۲ \cdot v_m^t, v_m^t \geq \mathbf{1}[z_m^{t-۱} = ۰] - \frac{\tau_{m,۰\to۲} - \delta_t}{M_\tau}, v_m^t \in \{۰,۱\} \quad (۱۶)$$

$$\sum_{b\in\mathcal{B}} \mathbf{1}[\text{MBS}_b \text{ active}] \geq B_{\min}, \forall t \quad (۱۷)$$

$$\sum_{m'\in\mathcal{M}\setminus\{m\}} a_{k,m'}^t + \sum_{b\in\mathcal{B}} a_{k,b}^t \geq a_{k,m}^{t-۱} \cdot \mathbf{1}[z_m^t < ۲, z_m^{t-۱} = ۲], \forall k, m, t \quad (۱۸)$$

$$\sum_{k\in\mathcal{K}} a_{k,b}^t \leq L_b^{\max}, \forall b \in \mathcal{B}, t \in \mathcal{T} \quad (۱۹)$$

$$z_m^t \in \{۰,۱,۲\}, \forall m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T} \quad (۲۰)$$

در این بخش، سطح پایین مسئله که به بهینه‌سازی تخصیص منابع رادیویی می‌پردازد، به‌صورت دقیق تشریح می‌شود. در این سطح، فرض می‌شود که متغیرهای حالت ایستگاه‌های پایه کوچک و همچنین انتساب کاربران به ایستگاه‌های SBS و MBS از سطح بالا مشخص و ثابت هستند. بنابراین، تمرکز اصلی بر تخصیص زیرکانال‌ها و توان ارسال در هر بازه زمانی قرار دارد.

معادله (۲۱) نسبت سیگنال به تداخل و نویز کاربر k را در زیرکانال n و بازه زمانی t تعریف می‌کند، مشروط بر این‌که کاربر به ایستگاه پایه کوچک m متصل باشد. در صورت کسر این رابطه، توان ارسالی تخصیص‌یافته به کاربر ضرب در بهره کانال قرار دارد که کیفیت لینک مطلوب را نشان می‌دهد. در مخرج، علاوه بر نویز حرارتی که به توان نویز و پهنای باند وابسته است، سه مؤلفه تداخل در نظر گرفته شده است. این ساختار بیانگر آن است که کیفیت دریافت کاربر نه‌تنها به توان خودش، بلکه به فعالیت سایر کاربران و ایستگاه‌ها نیز وابسته است. معادله (۲۲) تداخل درون‌سلولی را مدل می‌کند. این تداخل ناشی از سایر کاربرانی است که در همان SBS و همان زیرکانال فعال هستند. از آنجا که زیرکانال‌ها به‌صورت اشتراکی استفاده می‌شوند، توان ارسالی کاربران دیگر در همان سلول می‌تواند باعث افت کیفیت سیگنال کاربر موردنظر شود. معادله (۲۳) تداخل بین‌سلولی SBSها را بیان می‌کند. در این رابطه، تنها SBSهایی در نظر گرفته می‌شوند که در حالت فعال قرار دارند. توان ارسالی کاربران آن SBSها در همان زیرکانال، از طریق کانال بین‌سلولی، به‌عنوان تداخل بر کاربر k اثر می‌گذارد. این مؤلفه نقش مهمی در شبکه‌های متراکم با تعداد زیاد SBS ایفا می‌کند. معادله (۲۴) تداخل ناشی از ایستگاه‌های پایه ماکرو را تعریف

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

می‌کند. این تداخل حاصل ارسال کاربران متصل به MBSها در همان زیرکانال است و از طریق کانال ماکرو به کاربر SBS منتقل می‌شود. با این مدل، تداخل بین لایه ماکرو و لایه کوچک به‌صورت صریح در نظر گرفته می‌شود. معادله (۲۵) نرخ داده کاربر k را مشخص می‌کند. نرخ داده برابر مجموع نرخ‌های حاصل از تمام زیرکانال‌هایی است که به کاربر اختصاص داده شده‌اند. هر زیرکانال، متناسب با SINR مربوطه، سهمی از نرخ کل کاربر را فراهم می‌کند. این تعریف انعطاف‌پذیری تخصیص چندزیرکاناله را به‌خوبی نشان می‌دهد. معادله (۲۶) تابع هدف سطح پایین را معرفی می‌کند. هدف، بیشینه‌سازی تابعی است که از سه بخش تشکیل شده است: مطلوبیت مجموع کاربران، مصرف انرژی رادیویی، و شاخص انصاف. ضرایب وزنی لامبدا و نو اهمیت نسبی مصرف انرژی و انصاف را در برابر بیشینه‌سازی مطلوبیت تنظیم می‌کنند. این تابع هدف بیانگر موازنه میان کارایی طیفی، بهره‌وری انرژی و عدالت میان کاربران است. معادله (۲۷) مطلوبیت مجموع کاربران را تعریف می‌کند. در این رابطه، از تابع لگاریتمی نرخ داده استفاده شده است تا بازده نزولی نرخ‌ها مدل شود و از تخصیص ناعادلانه منابع به تعداد محدودی از کاربران جلوگیری گردد. وزن هر کاربر نیز اهمیت نسبی او را در تابع هدف مشخص می‌کند. معادله (۲۸) مصرف انرژی رادیویی را بیان می‌کند. این مصرف شامل مجموع توان‌های ارسالی تمام کاربران متصل به SBSهای فعال و همچنین کاربران متصل به MBSها است. در این مدل، تنها SBSهایی که در حالت فعال قرار دارند در مصرف انرژی لحاظ می‌شوند، که هماهنگی مستقیم با تصمیم‌های سطح بالا دارد. معادله (۲۹) شاخص انصاف Jain را معرفی می‌کند. این شاخص توزیع نرخ داده میان کاربران را ارزیابی می‌کند و مقادیر بالاتر آن نشان‌دهنده توزیع عادلانه‌تر منابع است. از آنجا که در تابع هدف، منفی این شاخص در نظر گرفته شده است، بیشینه‌سازی تابع هدف معادل با بیشینه‌سازی انصاف خواهد بود. محدودیت‌های سطح پایین با محدودیت توان ارسال SBS آغاز می‌شوند. معادله (۳۰) تضمین می‌کند که مجموع توان ارسالی یک SBS در تمام زیرکانال‌ها و برای همه کاربران، از حداکثر توان مجاز آن ایستگاه فراتر نرود. این محدودیت تنها زمانی فعال است که SBS در حالت فعال قرار داشته باشد. معادله (۳۱) محدودیت مشابهی را برای ایستگاه‌های پایه ماکرو اعمال می‌کند و حداکثر توان ارسالی هر MBS را محدود می‌سازد. معادله (۳۲) نیز غیرمنفی بودن توان‌های ارسالی را تضمین می‌کند که یک شرط فیزیکی بدیهی است. معادلات (۳۳) و (۳۴) بیان می‌کنند که هر زیرکانال در هر بازه زمانی فقط می‌تواند به یک کاربر در هر SBS یا MBS تخصیص یابد. این قیود از تداخل درون‌سلولی شدید جلوگیری کرده و ساختار دسترسی چندگانه مبتنی بر تخصیص مجزا را تحمیل می‌کنند. معادلات (۳۵) و (۳۶) حداقل SINR موردنیاز برای هر کاربر را تضمین می‌کنند. به این ترتیب، تنها در صورتی که یک زیرکانال به کاربر اختصاص یابد، کیفیت لینک آن باید حداقل آستانه تعریف‌شده QoS را برآورده سازد. معادلات (۳۷) و (۳۸) حداقل نرخ داده کاربر را اعمال می‌کنند. اگر کاربر به یک SBS یا MBS منتسب شده باشد، نرخ داده کل او باید حداقل مقدار موردنیاز را تأمین کند. این قیود ارتباط مستقیمی میان تصمیم‌های انتساب و تخصیص منابع ایجاد می‌کنند. معادله (۳۹) کنترل تداخل بین SBSها را در هر زیرکانال اعمال می‌کند. این قید، مجموع تداخل دریافتی از سایر SBSهای فعال را به یک حد بالای مجاز محدود می‌سازد تا از افت شدید کیفیت لینک کاربران جلوگیری شود. معادله (۴۰) حداقل بهره‌وری طیفی را برای هر زیرکانال تخصیص‌یافته تضمین می‌کند. این قید باعث می‌شود که تخصیص زیرکانال تنها زمانی انجام شود که بازده طیفی آن از یک آستانه مشخص بیشتر باشد. معادلات (۴۱) و (۴۲) سازگاری میان تخصیص زیرکانال و انتساب کاربر را تضمین می‌کنند. به بیان دیگر، کاربری که به یک ایستگاه منتسب نشده است، نمی‌تواند هیچ زیرکانالی از آن ایستگاه دریافت کند. معادله (۴۳) حداقل تعداد زیرکانال لازم برای هر کاربر فعال را مشخص می‌کند. این قید تضمین می‌کند که کاربران فعال حداقل منابع لازم برای دستیابی به نرخ‌های معنادار را دریافت کنند. معادله (۴۴) حداکثر توان مجاز در هر زیرکانال را محدود می‌کند. این حد بالا بر اساس حداکثر توان SBS و همچنین SINR هدف کاربر تعیین می‌شود و نقش مهمی در کنترل دقیق تداخل ایفا می‌کند. در نهایت، معادله (۴۵) تعادل بار زیرکانال‌ها در ایستگاه‌های پایه ماکرو را برقرار می‌سازد. این قید اختلاف تعداد زیرکانال‌های تخصیص‌یافته بین زیرکانال‌های مختلف را محدود می‌کند تا از تمرکز بیش‌ازحد بار روی برخی فرکانس‌ها جلوگیری شود و توزیع یکنواخت‌تری از منابع در MBS حاصل گردد.

$$\mathrm{SINR}_{k,n}^{m,t} = \frac{p_{k,n}^{m,t} \cdot h_{m,k,n}^{t}}{\sigma^{2} W + I_{k,n}^{m,t,\mathrm{intra}} + I_{k,n}^{m,t,\mathrm{inter}} + I_{k,n}^{m,t,\mathrm{macro}}} \quad (۲۱)$$

$$I_{k,n}^{m,t,\mathrm{intra}} = \sum_{k' \in \mathcal{K}_m,\, k' \neq k} x_{k',n}^{m,t} \cdot p_{k',n}^{m,t} \cdot h_{m,k,n}^{t} \quad (۲۲)$$

$$I_{k,n}^{m,t,\mathrm{inter}} = \sum_{m' \in \mathcal{M},\, m' \neq m} \mathbf{1}[z_{m'}^{t} = 2] \sum_{k' \in \mathcal{K}_{m'}} x_{k',n}^{m',t} \cdot p_{k',n}^{m',t} \cdot h_{m',k,n}^{t} \quad (۲۳)$$

$$I_{k,n}^{m,t,\mathrm{macro}} = \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{k' \in \mathcal{K}_b} x_{k',n}^{b,t} \cdot p_{k',n}^{b,t} \cdot g_{b,k,n}^{t} \quad (۲۴)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3 - Autumn 2025

$$R_k^t = \sum_{n\in\mathcal{N}} x_{k,n}^{m,t} \cdot W\log_{۲}\left(۱ + \mathrm{SINR}_{k,n}^{m,t}\right) \quad (۲۵)$$

$$\max_{x_{k,n}^{m,t}, x_{k,n}^{b,t}, p_{k,n}^{m,t}, p_{k,n}^{b,t}} \mathcal{F}_{\mathrm{LL}} = \mathcal{U}_{\mathrm{sum}} - \lambda \cdot \mathcal{E}_{\mathrm{radio}} - \nu \cdot \mathcal{J}_{\mathrm{fairness}} \quad (۲۶)$$

$$\mathcal{U}_{\mathrm{sum}} = \sum_{k\in\mathcal{K}} \xi_k \cdot \log\left(۱ + R_k^t\right) \quad (۲۷)$$

$$\mathcal{E}_{\mathrm{radio}} = \sum_{m\in\mathcal{M}} \mathbf{1}[z_m^t = ۲] \sum_{k\in\mathcal{K}_m} \sum_{n\in\mathcal{N}} p_{k,n}^{m,t} + \sum_{b\in\mathcal{B}} \sum_{k\in\mathcal{K}_b} \sum_{n\in\mathcal{N}} p_{k,n}^{b,t} \quad (۲۸)$$

$$\mathcal{J}_{\mathrm{fairness}} = \frac{\left(\sum_{k\in\mathcal{K}} R_k^t\right)^{۲}}{K \cdot \sum_{k\in\mathcal{K}} \left(R_k^t\right)^{۲}} \quad (۲۹)$$

$$\sum_{k\in\mathcal{K}_m} \sum_{n\in\mathcal{N}} x_{k,n}^{m,t} \cdot p_{k,n}^{m,t} \le P_m^{\max} \cdot \mathbf{1}[z_m^t = ۲], \forall m \in \mathcal{M}, t \quad (۳۰)$$

$$\sum_{k\in\mathcal{K}_b} \sum_{n\in\mathcal{N}} x_{k,n}^{b,t} \cdot p_{k,n}^{b,t} \le P_b^{\max}, \forall b \in \mathcal{B}, t \quad (۳۱)$$

$$p_{k,n}^{m,t} \ge ۰, p_{k,n}^{b,t} \ge ۰, \forall k, n, m, b, t \quad (۳۲)$$

$$\sum_{k\in\mathcal{K}_m} x_{k,n}^{m,t} \le ۱, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}, t \quad (۳۳)$$

$$\sum_{k\in\mathcal{K}_b} x_{k,n}^{b,t} \le ۱, \forall b \in \mathcal{B}, n \in \mathcal{N}, t \quad (۳۴)$$

$$\mathrm{SINR}_{k,n}^{m,t} \ge \Gamma_k^{\min} \cdot x_{k,n}^{m,t}, \forall k \in \mathcal{K}_m, n, m, t \quad (۳۵)$$

$$\mathrm{SINR}_{k,n}^{b,t} \ge \Gamma_k^{\min} \cdot x_{k,n}^{b,t}, \forall k \in \mathcal{K}_b, n, b, t \quad (۳۶)$$

$$R_k^t \ge R_k^{\min} \cdot a_{k,m}^t, \forall k \in \mathcal{K}, m \in \mathcal{M}, t \quad (۳۷)$$

$$R_k^t \ge R_k^{\min} \cdot a_{k,b}^t, \forall k \in \mathcal{K}, b \in \mathcal{B}, t \quad (۳۸)$$

$$\sum_{m'\in\mathcal{M}, m'\ne m} \mathbf{1}[z_{m'}^t = ۲] \sum_{k'\in\mathcal{K}_{m'}} x_{k',n}^{m',t} \cdot p_{k',n}^{m',t} \cdot h_{m',k,n}^t \le \rho_{m,n}^{\max}, \forall m, n, k \in \mathcal{K}_m, t \quad (۳۹)$$

$$W\log_{۲}\left(۱ + \mathrm{SINR}_{k,n}^{m,t}\right) \ge \eta_{\min} \cdot x_{k,n}^{m,t}, \forall k, n, m, t \quad (۴۰)$$

$$\sum_{n\in\mathcal{N}} x_{k,n}^{m,t} \le N \cdot a_{k,m}^t, \forall k \in \mathcal{K}, m \in \mathcal{M}, t \quad (۴۱)$$

$$\sum_{n\in\mathcal{N}} x_{k,n}^{b,t} \le N \cdot a_{k,b}^t, \forall k \in \mathcal{K}, b \in \mathcal{B}, t \quad (۴۲)$$

$$\sum_{n\in\mathcal{N}} x_{k,n}^{m,t} \ge N_k^{\min} \cdot a_{k,m}^t, \forall k \in \mathcal{K}, m \in \mathcal{M}, t \quad (۴۳)$$

$$p_{k,n}^{m,t} \le P_{k,n}^{m,\max} \cdot x_{k,n}^{m,t}, \forall k, n, m, t \quad (۴۴)$$

$$\left|\sum_{k\in\mathcal{K}_b} x_{k,n}^{b,t} - \sum_{k\in\mathcal{K}_b} x_{k,n'}^{b,t}\right| \le \Delta_n^{\max}, \forall n, n' \in \mathcal{N}, b \in \mathcal{B}, t \quad (۴۵)$$

۳- شبیه‌سازی‌ها و نتایج

شبیه‌سازی‌ها در یک محیط شهری با پوشش دولایه انجام شده است. یک سلول ماکرو مرکزی با شعاع ۵۰۰ متر به‌عنوان لایه اول در نظر گرفته شده و ۱۲ ایستگاه پایه کوچک (SBS) به‌صورت تصادفی در داخل این سلول توزیع شده‌اند. کاربران به تعداد ۶۰ نفر با توزیع یکنواخت در سطح سلول قرار دارند. کانال رادیویی بر اساس مدل انتشار ۳GPP Urban Micro (UMi) برای لینک SBS-UE و مدل Urban Macro (UMa) برای لینک MBS-UE شبیه‌سازی شده است. محو شدگی سریع (Fast Fading) با کانال Rayleigh و محو شدگی آهسته (Shadowing) با انحراف معیار ۸ dB برای SBS و ۱۰ dB برای MBS مدل شده است. طیف فرکانسی در باند ۲.۱ گیگاهرتز با پهنای باند کل ۲۰ مگاهرتز است که به ۱۰۰ زیرکانال ۱۸۰ کیلوهرتزی (سازگار با LTE-A) تقسیم شده. افق زمانی بهینه‌سازی ۲۴ ساعته با ۴۸ بازه ۳۰ دقیقه‌ای است. پروفایل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

ترافیک شبانه‌روزی از مدل ترافیک ۳GPP TR ۳۶.۸۱۴ استخراج شده که اوج ترافیک در ساعات ۸ صبح تا ۱۰ شب و کمینه در ساعات ۲ تا ۵ بامداد قرار دارد. الگوریتم ACA در محیط MATLAB R۲۰۲۳b پیاده‌سازی شده و نتایج مقایسه‌ای با الگوریتم‌های GA، PSO، و DQN (Deep Q-Network) به‌عنوان مبنا ارائه شده است. هر آزمایش ۳۰ بار تکرار شده و نتایج میانگین و انحراف معیار گزارش می‌شود. جدول ۲ پارامترهای اصلی شبکه شبیه‌سازی‌شده را شامل مشخصات توپولوژی سلولی، تعداد ایستگاه‌ها و کاربران، منابع فرکانسی، مدل‌های کانال، و تنظیمات زمانی افق بهینه‌سازی نشان می‌دهد.

Table (2): Network parameters

جدول (۲): پارامترهای شبکه

پارامتر	مقدار
شعاع سلول ماکرو	۵۰۰ متر
تعداد SBS	۱۲
شعاع پوشش SBS	۵۰ متر
تعداد کاربران	۶۰
پهنای باند کل	۲۰ مگاهرتز
تعداد زیرکانال (N)	۱۰۰
پهنای باند هر زیرکانال (W)	۱۸۰ کیلوهرتز
فرکانس مرکزی	۲.۱ گیگاهرتز
مدل کانال SBS-UE	۳GPP UMi
مدل کانال MBS-UE	۳GPP UMa
انحراف معیار Shadowing (SBS)	۸ dB
انحراف معیار Shadowing (MBS)	۱۰ dB
افق زمانی	۲۴ ساعت
تعداد بازه‌های زمانی (T)	۴۸
طول هر بازه (δ_t)	۱۸۰۰ ثانیه

جدول ۳ پارامترهای مربوط به توان مصرفی و ارسال ایستگاه‌های پایه ماکرو و کوچک را در حالات مختلف عملکردی، شامل حالت فعال و حالت‌های خواب، به‌همراه بازده تقویت‌کننده و هزینه‌های سوئیچینگ نشان می‌دهد. جدول ۴ پارامترهای مربوط به تأخیر بیداری ایستگاه‌های پایه، قیود QoS کاربران، و آستانه‌های عملکرد شبکه را که در مدل‌سازی کیفیت سرویس به‌کار رفته‌اند، خلاصه می‌کند. جدول ۵ تنظیمات و پارامترهای اصلی الگوریتم بهینه‌سازی تک‌یاخته‌ای مصنوعی (ACA)، شامل پارامترهای جمعیت، همگرایی و کنترل فرآیند جستجو را ارائه می‌دهد.

Table (3): Base station power parameters

جدول (۳): پارامترهای توان ایستگاه‌های پایه

پارامتر	MBS	SBS
حداکثر توان ارسال	dBm ۴۶	dBm ۲۳
توان مدار ثابت (P^{act})	W ۱۳۰	W ۶.۸
توان خواب سبک (P^{s_1})	—	W ۱.۳
توان خواب عمیق (P^{s_0})	—	W ۰.۱۵
بازده تقویت‌کننده (η^{PA})	۳۸.۸٪	۲۵٪
ضریب شیب توان (α)	۴.۷	۷.۸
انرژی سوئیچینگ $s_1 \to s_2$	—	۰.۵ ژول
انرژی سوئیچینگ $s_0 \to s_2$	—	۲.۱ ژول

Table (4): Latency and QoS parameters

چهار سناریو برای ارزیابی مدل تعریف شده است. سناریو ۱ (مرجع): تمام SBSها در تمام بازه‌های زمانی فعال هستند. تخصیص منابع با الگوریتم Round-Robin انجام می‌شود. این سناریو معیار مصرف انرژی ماکزیمم را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3 - Autumn 2025

سناریو ۲ (خواب ساده): یک آستانه ثابت بر اساس بار ترافیکی تعریف می‌شود. اگر تعداد کاربران یک SBS کمتر از ۲ نفر باشد، آن SBS وارد خواب عمیق می‌شود. تخصیص منابع با Water-Filling انجام می‌شود. سناریو ۳ (بهینه‌سازی تک‌سطحی): فقط سطح پایین مدل (تخصیص منابع) با ACA حل می‌شود و استراتژی خواب ثابت و از پیش تعیین‌شده است.

جدول (۴): پارامترهای تأخیر و QoS

مقدار	پارامتر
۵۰ میلی‌ثانیه	تأخیر بیداری خواب سبک ($\tau_{m,1\to2}$)
۲۵۰ میلی‌ثانیه	تأخیر بیداری خواب عمیق ($\tau_{m,.\to2}$)
dB ۳	حداقل SINR کاربر ($\Gamma_k^{\min}$)
Mbps ۰.۵	حداقل نرخ داده کاربر عادی ($R_k^{\min}$)
Mbps ۲	حداقل نرخ داده کاربر اولویت‌دار ($R_k^{\min}$)
۵۰۰ میلی‌ثانیه	حداکثر تأخیر قابل قبول ($D_k^{\max}$)
۲ بازه (۶۰ دقیقه)	حداقل زمان ماندن در حالت (T_m^{dwell})
۰.۹۵	نسبت حداقل کاربران راضی ($\Omega^{\min}$)

Table (5): ACA algorithm parameters

جدول (۵): پارامترهای الگوریتم ACA

مقدار	پارامتر
۱۰۰	تعداد سلول‌های اولیه
۵۰۰	حداکثر تعداد نسل
۰.۳	نرخ تقسیم سلولی (Mitosis Rate)
۰.۰۵	آستانه ادغام (Fusion Threshold)
۰.۰۲	نرخ جهش ژنتیکی
۰.۴	ضریب انرژی سیتوپلاسمی
$\epsilon = ۱۰^{-۴}$	معیار همگرایی
۳۰۰ ثانیه	حداکثر زمان اجرا

سناریو ۴ (مدل پیشنهادی): هر دو سطح با ACA به‌صورت تکراری حل می‌شوند. سه زیرسناریو تعریف می‌شود: الف) وزن $\beta = ۰.۳$ (اولویت QoS)، ب) $\beta = ۰.۶$ (متعادل)، ج) $\beta = ۰.۹$ (اولویت انرژی).

نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که با حرکت از سناریوی مرجع S1 به سمت سناریوهای پیشنهادی، کاهش معناداری در مصرف انرژی شبکه حاصل شده است. در سناریوی S1 که از الگوریتم Round-Robin بدون مدیریت خواب استفاده می‌کند، بیشترین مصرف انرژی و کمترین بهره‌وری انرژی مشاهده می‌شود که بیانگر ناکارآمدی رویکردهای سنتی در شبکه‌های متراکم است. اعمال خواب ساده در S2 اگرچه مصرف انرژی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده، اما همچنان از نظر بهره‌وری انرژی و توازن QoS با روش‌های پیشرفته فاصله دارد. سناریوی S3 با استفاده از بهینه‌سازی تک‌سطحی مبتنی برACA ، بهبود بیشتری را هم در مصرف انرژی و هم در بهره‌وری انرژی نشان می‌دهد که حاکی از نقش مؤثر بهینه‌سازی هوشمند منابع است. در سناریوهای S4 که رویکرد دومرحله‌ای و وزن‌دهی β بین انرژی و QoSرا در نظر می‌گیرند، مشاهده می‌شود که افزایش β تا مقدار ۰.۶ منجر به بیشترین صرفه‌جویی انرژی و بالاترین بهره‌وری انرژی می‌شود، در حالی که مقدار بسیار بالای β در S4-γ اگرچه مصرف انرژی را به حداقل می‌رساند، اما با کاهش نسبی بهره‌وری انرژی همراه است. این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب مناسب پارامتر β نقش کلیدی در ایجاد توازن میان کاهش مصرف انرژی و حفظ کارایی شبکه دارد و رویکرد پیشنهادی قادر است با تنظیم این پارامتر، عملکرد شبکه را متناسب با اهداف اپراتور بهینه کند.

نتایج جدول (۷) نشان می‌دهد که در سناریوی S4-β بیشترین سهم مصرف انرژی شبکه بهSBS های فعال اختصاص دارد، به‌طوری‌که مجموع مصرف مدار ثابت و مصرف رادیویی آن‌ها بیش از نیمی از انرژی کل را تشکیل می‌دهد که بیانگر نقش غالب ایستگاه‌های کوچک در مصرف انرژی شبکه‌های متراکم است. در مقابل، مصرف انرژی ایستگاه‌های ماکرو، چه در بخش مدار ثابت و چه در بخش رادیویی، سهم کمتری از کل انرژی را به خود اختصاص داده و نشان می‌دهد که تعداد محدودMBS ها اثر کمتری بر مصرف کل دارند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3 - Autumn 2025

Table (6): Comparison of network energy consumption in 24 hours
جدول (۶): مقایسه مصرف انرژی شبکه در ۲۴ ساعت

سناریو	الگوریتم	مصرف انرژی (kWh)	صرفه‌جویی نسبت به S۱ (٪)	بهره‌وری انرژی (Mbits/kWh)
S۱ (مرجع)	Round-Robin	۴۸.۷	—	۱۲۳.۴
S۲ (خواب ساده)	Water-Filling	۳۵.۲	۲۷.۷	۱۵۸.۶
S۳ (تک‌سطحی)	ACA	۳۲.۱	۳۴.۱	۱۷۴.۳
S۴-α ($\beta = ۰.۳$)	ACA	۳۱.۸	۳۴.۷	۱۸۱.۲
S۴-β ($\beta = ۰.۶$)	ACA	۲۸.۴	۴۱.۷	۱۹۶.۸
S۴-γ ($\beta = ۰.۹$)	ACA	۲۵.۱	۴۸.۵	۱۸۸.۳

انرژی مصرفی در حالت‌های خواب سبک و خواب عمیقSBS ها در مجموع کمتر از ۱۳ درصد کل انرژی است که حاکی از اثربخشی سیاست‌های خواب در کاهش مصرف انرژی بدون خاموشی کامل شبکه است. همچنین، سهم انرژی سوئیچینگ نسبتاً محدود بوده و کمتر از ۵ درصد کل مصرف را شامل می‌شود که نشان می‌دهد هزینه تغییر حالتSBS ها در مقایسه با صرفه‌جویی حاصل از خاموشی و خواب ایستگاه‌ها قابل قبول است. به‌طور کلی، این توزیع انرژی تأیید می‌کند که سناریوی S4-β با مدیریت هوشمند حالت‌های کاریSBS ها توانسته است توازن مناسبی میان کاهش مصرف انرژی، کنترل هزینه‌های سوئیچینگ و حفظ عملکرد شبکه برقرار کند.

Table (7): Aggregate energy consumption by source (S4-β scenario)
جدول (۷): مصرف انرژی تجمیعی بر حسب منبع (سناریو S4-β)

منبع	انرژی (kWh)	درصد از کل
MBS (مدار ثابت)	۵.۶۲	۱۹.۸
MBS (رادیویی)	۳.۱۴	۱۱.۱
SBS فعال (مدار ثابت)	۸.۳۱	۲۹.۳
SBS فعال (رادیویی)	۶.۴۸	۲۲.۸
SBS خواب سبک	۲.۷۸	۹.۸
SBS خواب عمیق	۰.۸۹	۳.۱
سوئیچینگ	۱.۱۸	۴.۱
مجموع	۲۸.۴	۱۰۰

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که سناریوی مرجع S1 با وجود نرخ داده متوسط قابل قبول، از نظر انصاف و نسبت کاربران راضی عملکرد محدودی دارد و با حرکت به سمت S2، اگرچه مصرف انرژی کاهش یافته، اما افت محسوس در QoS به‌ویژه در شاخص Jain و نسبت کاربران راضی مشاهده می‌شود. سناریوی S3 با استفاده از بهینه‌سازی پیشرفته‌تر، بهبود هم‌زمان نرخ داده، کاهش پراکندگی نرخ‌ها و افزایش انصاف را محقق کرده است. در سناریوهای S4، تنظیم وزن β نقش تعیین‌کننده‌ای در توازن میان انرژی و QoS دارد؛ به‌طوری‌که S4-α بالاترین نرخ داده و بهترین انصاف را ارائه می‌دهد، در حالی که S4-β با حفظ سطح بالای کاربران راضی، توازن مناسبی میان نرخ داده، انصاف و تأخیر برقرار می‌کند. افزایش بیش از حد β در S4-γ منجر به افت نرخ داده و افزایش تأخیر شده که نشان‌دهنده اولویت بیش از حد صرفه‌جویی انرژی به زیان QoS است. جدول ۹ رفتار تطبیقی SBSها را در سناریوی S4-β نسبت به تغییرات ترافیک روزانه نشان می‌دهد. در ساعات کم‌ترافیک شبانه، بخش قابل‌توجهی از SBSها در حالت خواب عمیق یا خواب سبک قرار دارند که بیانگر بهره‌گیری مؤثر از مکانیسم خواب برای کاهش مصرف انرژی است. با افزایش تدریجی ترافیک در ساعات صبح و اوج مصرف، تعداد SBSهای فعال به‌طور معناداری افزایش می‌یابد و در بازه ۱۸:۰۰ تا ۲۱:۰۰ تقریباً تمامی SBSها فعال هستند. این تطابق مستقیم بین وضعیت SBSها و ترافیک نسبی شبکه نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی قادر است منابع را به‌صورت پویا و آگاه از بار شبکه مدیریت کند. نتایج جدول ۱۰ مقایسه روش ACA پیشنهادی با الگوریتم‌های PSO، GA و DQN را از نظر کارایی انرژی، QoS و سرعت همگرایی نشان می‌دهد. ACA کمترین مصرف انرژی و بالاترین نرخ داده متوسط و شاخص Jain را با نوسان کمتر نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌دهد که حاکی از پایداری و کیفیت بالای جواب‌ها است. در عین حال، زمان همگرایی ACA به‌طور محسوسی کمتر از GA و DQN بوده و با تعداد تکرار کمتر به جواب بهتر دست یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم تک‌یاخته‌ای مصنوعی، به‌ویژه برای مسائل ترکیبی و غیرخطی مدیریت انرژی و منابع در شبکه‌های ناهمگن، کارایی بالاتر و توازن بهتری میان کیفیت راه‌حل و پیچیدگی محاسباتی فراهم می‌کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3 - Autumn 2025

Table (8): QoS indicators in different scenarios

جدول (۸): شاخص‌های QoS در سناریوهای مختلف

سناریو	میانگین نرخ داده (Mbps/user)	انحراف معیار نرخ	شاخص Jain	نسبت کاربران راضی (٪)	تأخیر میانگین (ms)
S۱	۲.۴۱	۱.۲۳	۰.۷۴	۹۱.۲	۱۸.۳
S۲	۲.۱۸	۱.۴۷	۰.۶۸	۸۷.۴	۲۴.۶
S۳	۲.۶۳	۰.۹۸	۰.۸۱	۹۳.۷	۲۱.۴
S۴-α	۲.۷۸	۰.۸۷	۰.۸۴	۹۵.۸	۲۳.۱
S۴-β	۲.۵۹	۰.۹۱	۰.۸۳	۹۵.۲	۲۵.۷
S۴-γ	۲.۱۴	۱.۱۸	۰.۷۶	۹۰.۳	۲۷.۳

Table (9): Distribution of SBS states in time intervals (S4-β scenario, average of 12 SBS)

جدول (۹): توزیع حالت SBSها در بازه‌های زمانی (سناریو S4-β، میانگین ۱۲ SBS)

بازه زمانی	تعداد SBS فعال	تعداد خواب سبک	تعداد خواب عمیق	ترافیک نسبی (٪)
۰۲:۰۰–۰۰:۰۰	۴.۲	۳.۱	۴.۷	۱۲
۰۵:۰۰–۰۲:۰۰	۲.۸	۲.۴	۶.۸	۷
۰۸:۰۰–۰۵:۰۰	۵.۱	۳.۶	۳.۳	۲۸
۱۲:۰۰–۰۸:۰۰	۹.۴	۱.۸	۰.۸	۸۷
۱۴:۰۰–۱۲:۰۰	۱۰.۱	۱.۳	۰.۶	۹۳
۱۸:۰۰–۱۴:۰۰	۸.۷	۲.۱	۱.۲	۷۴
۲۱:۰۰–۱۸:۰۰	۱۱.۲	۰.۵	۰.۳	۱۰۰
۲۴:۰۰–۲۱:۰۰	۷.۳	۲.۸	۱.۹	۵۸

Table (10): Comparison of the performance of different algorithms in the S4-β scenario

جدول (۱۰): مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف در سناریو S4-β

الگوریتم	مصرف انرژی (kWh)	نرخ داده (Mbps/user)	شاخص Jain	زمان همگرایی (s)	تعداد تکرار
PSO	۳۱.۲ ± ۱.۴	۲.۳۱ ± ۰.۱۴	۰.۷۸	۱۸۴.۳	۳۸۲
GA	۳۰.۸ ± ۱.۱	۲.۴۴ ± ۰.۱۱	۰.۷۹	۲۱۷.۶	۴۱۵
DQN	۲۹.۶ ± ۰.۸	۲.۵۱ ± ۰.۰۹	۰.۸۱	۲۵۳.۱	۵۰۰*
ACA (پیشنهادی)	۲۸.۴ ± ۰.۶	۲.۵۹ ± ۰.۰۸	۰.۸۳	۱۴۸.۷	۳۱۴

نتایج حساسیت نشان می‌دهد طبق جدول ۱۱ نشان می‌دهد که افزایش β موجب کاهش تدریجی مصرف انرژی و تعداد سوئیچینگ‌ها می‌شود، اما هم‌زمان نرخ داده و نسبت کاربران راضی کاهش می‌یابد. نقطه β=0.6 به‌عنوان تعادل بهینه شناسایی می‌شود؛ جایی که ۴۱.۷٪ صرفه‌جویی انرژی با ۹۵.۲٪ رضایت کاربران به‌طور هم‌زمان حاصل شده و نوسانات شبکه نیز کنترل شده است. با افزایش چگالی کاربران طبلق جدول ۱۱، مصرف انرژی افزایش یافته و نرخ داده و بهره‌وری انرژی کاهش می‌یابد که رفتاری طبیعی در شبکه‌های متراکم است. با این حال، الگوریتم پیشنهادی از طریق افزایش تدریجی تعداد SBSهای فعال (از ۵.۱ به ۱۲)، افت QoS را مدیریت کرده و پایداری سرویس را حفظ می‌کند. این نتیجه نشان می‌دهد که چارچوب دو سطحی از مقیاس‌پذیری مناسبی برخوردار است.

Table (11): Effect of β on performance (12 SBS, 60 users)

جدول (۱۱): تأثیر β بر عملکرد (۱۲ SBS، ۶۰ کاربر)

β	مصرف انرژی (kWh)	نرخ داده (Mbps/user)	نسبت کاربران راضی (٪)	تعداد سوئیچینگ
۰.۱	۳۱.۹	۲.۸۴	۹۶.۴	۱۴۲
۰.۲	۳۰.۷	۲.۷۶	۹۵.۹	۱۳۱
۰.۳	۳۱.۸	۲.۷۸	۹۵.۸	۱۱۸
۰.۴	۳۰.۱	۲.۷۱	۹۵.۶	۱۰۷
۰.۵	۲۹.۳	۲.۶۵	۹۵.۴	۹۶
۰.۶	۲۸.۴	۲.۵۹	۹۵.۲	۸۳
۰.۷	۲۷.۱	۲.۴۸	۹۴.۱	۷۴
۰.۸	۲۶.۳	۲.۳۱	۹۲.۷	۶۸
۰.۹	۲۵.۱	۲.۱۴	۹۰.۳	۵۹

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3 - Autumn 2025

Table (12): Impact of user density (Scenario S4-β, β=0.6)

جدول (۱۲): تأثیر چگالی کاربران (سناریو S4-β، β=0.6)

تعداد SBS فعال (میانگین)	بهره‌وری (Mbits/kWh)	نرخ داده (Mbps/user)	مصرف انرژی (kWh)	تعداد کاربران
۵.۱	۲۸۱.۲	۵.۱۴	۱۸.۳	۲۰
۶.۴	۲۶۴.۸	۳.۸۲	۲۱.۷	۳۰
۷.۶	۲۳۱.۶	۳.۱۷	۲۴.۲	۴۰
۹.۱	۱۹۶.۸	۲.۵۹	۲۸.۴	۶۰
۱۰.۳	۱۷۸.۴	۲.۱۸	۳۲.۶	۸۰
۱۱.۶	۱۵۹.۱	۱.۸۷	۳۶.۸	۱۰۰
۱۲.۰	۱۳۸.۳	۱.۶۲	۴۱.۴	۱۲۰

نتایج جدول ۱۳ نشـان می‌دهد که با افزایش تعدادSBS ها، بُعد فضـای حالت به‌صـورت نمایی رشـد می‌کند که بیانگر افزایش شـدید پیچیدگی مسئله بهینه‌سازی در شبکه‌های متراکم‌تر است. با وجود این رشد چشمگیر فضای جست‌وجو، الگوریتم ACA همچنان قادر است در زمان همگرایی قابل قبول به راه‌حل پایدار برسد، به‌طوری‌که زمان همگرایی از ۶۸.۳ ثانیه برای ۶ SBS به ۳۸۴.۳ ثانیه برای ۳۶ SBSافزایش یافته است. این افزایش، اگرچه قابل توجه است، اما نسبت به رشد نمایی فضای حالت، رفتاری کنترل‌شده و تدریجی دارد که نشان‌دهنده کارایی ساختار جست‌وجوی ACA در مدیریت پیچیدگی ترکیبی مسئله است. در مقابل، الگوریتم GA با افزایش تعداد SBSها دچار افت شدید مقیاس‌پذیری شده و زمان همگرایی آن از ۱۰۴.۷ ثانیه به بیش از ۱۸۰۰ ثانیه افزایش یافته است که عملاً کاربرد آن را در سناریوهای بزرگ محدود می‌کند. از منظر عملکرد انرژی، مشاهده می‌شود که با افزایش تعدادSBS ها، درصد کاهش مصرف انرژی نیز به‌تدریج افزایش می‌یابد و از ۳۶.۲ درصد به ۴۵.۸ درصد می‌رسد که نشان می‌دهد چگالی بالاترSBS ها انعطاف‌پذیری بیشتری برای خاموشی و مدیریت هوشمند حالت‌ها فراهم می‌کند. این رفتار بیانگر آن است که الگوریتم پیشنهادی نه‌تنها از نظر محاسباتی مقیاس‌پذیر باقی می‌ماند، بلکه با بزرگ‌تر شدن شبکه، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی آن نیز تقویت می‌شود و در نتیجه برای پیاده‌سازی در شبکه‌های ناهمگن متراکم گزینه‌ای عملی و مؤثر محسوب می‌شود.

Table (13): Algorithm behavior with increasing number of SBS

جدول (۱۳): رفتار الگوریتم با افزایش تعداد SBS

مصرف انرژی نسبی (٪ کاهش)	زمان همگرایی GA (s)	زمان همگرایی ACA (s)	بُعد فضای حالت	تعداد SBS
۳۶.۲	۱۰۴.۷	۶۸.۳	$۶^{۴۸}$	۶
۴۱.۷	۲۱۷.۶	۱۴۸.۷	$۱۲^{۴۸}$	۱۲
۴۳.۱	۴۸۳.۲	۲۱۴.۱	$۱۸^{۴۸}$	۱۸
۴۴.۳	۹۸۷.۴	۲۷۸.۶	$۲۴^{۴۸}$	۲۴
۴۵.۸	۱۸۰۰<	۳۸۴.۳	$۳۶^{۴۸}$	۳۶

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله، یک چارچوب جامع برای مدیریت انرژی در شبکه‌های سلولی ناهمگن ارائه شد که در آن، تصمیم‌گیری درباره حالت‌های کاری ایستگاه‌های پایه کوچک و تخصیص منابع رادیویی به‌صورت هماهنگ و در قالب یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی انجام می‌گیرد. در سطح بالا، استراتژی خواب ایستگاه‌های پایه کوچک با در نظر گرفتن حالت‌های فعال، خواب سبک و خواب عمیق و همچنین هزینه و تأخیر ناشی از تغییر حالت‌ها مدل‌سازی شد و در سطح پایین، تخصیص توان و زیرکانال با هدف ایجاد توازن میان مصرف انرژی، کیفیت سرویس و انصاف کاربران صورت پذیرفت. مسئله حاصل به‌صورت یک مسئله ترکیبی-صحیح غیرخطی فرموله شد و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکیاخته‌ای مصنوعی حل گردید که امکان بهینه‌سازی همزمان متغیرهای گسسته و پیوسته را فراهم می‌سازد. نتایج شبیه‌سازی مبتنی بر سناریوهای استاندارد و شرایط ترافیکی متغیر نشان داد که روش پیشنهادی قادر است کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی شبکه ایجاد کند، بدون آن‌که افت محسوسی در کیفیت سرویس کاربران مشاهده شود. مقایسه با روش‌های مرجع نشان داد که چارچوب پیشنهادی نه‌تنها از نظر بهره‌وری انرژی عملکرد بهتری دارد، بلکه از نظر نرخ داده متوسط، سطح رضایت کاربران و انصاف نیز نتایج پایدارتری ارائه می‌دهد. همچنین، رفتار تطبیقی روش پیشنهادی در ساعات کم‌ترافیک و پرترافیک نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده توانایی انطباق مؤثر با تغییرات زمانی بار شبکه را داشته و تصمیمات خواب ایستگاه‌های پایه را به‌صورت واقع‌بینانه و کارآمد اتخاذ می‌کند. تحلیل حساسیت پارامترهای مدل نیز بیانگر آن است که تنظیم مناسب وزن‌های مصالحه نقش کلیدی در دستیابی به تعادل میان مصرف انرژی و کیفیت سرویس دارد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در نظر گرفتن همزمان استراتژی خواب ایستگاه‌های پایه و تخصیص منابع رادیویی در قالب یک چارچوب دوسطحی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای مدیریت انرژی شبکه‌های سلولی نسل آینده مورد استفاده قرار گیرد و زمینه‌ساز طراحی شبکه‌هایی با بهره‌وری انرژی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

بالاتر و کیفیت سرویس قابل قبول باشد. در پژوهش‌های آینده، می‌توان چارچوب پیشنهادی را با در نظر گرفتن تحرک کاربران و عدم قطعیت در الگوهای ترافیکی توسعه داد و همچنین به‌کارگیری روش‌های یادگیری تطبیقی برای کاهش پیچیدگی محاسباتی و بهبود عملکرد بلادرنگ شبکه مورد بررسی قرار گیرد.

References
مراجع

[1] Y. S. Soh, T. Q. S. Quek, M. Kountouris, and H. Shin, "Energy efficient heterogeneous cellular networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 31, no. 5, pp. 840–850, May 2013, doi: 10.1109/JSAC.2013.130503.

[2] E. Oh, K. Son, and B. Krishnamachari, "Dynamic base station switching-on/off strategies for green cellular networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 12, no. 5, pp. 2126–2136, May 2013, doi: 10.1109/TWC.2013.032013.120494.

[3] F. Han, S. Zhao, L. Zhang, and J. Wu, "Survey of strategies for switching off base stations in heterogeneous networks for greener 5G systems," IEEE Access, vol. 4, pp. 4959–4973, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2598813.

[4] H. Tabassum, U. Siddique, E. Hossain, and M. J. Hossain, "Downlink performance of cellular systems with base station sleeping, user association, and scheduling," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 13, no. 10, pp. 5752–5767, Oct. 2014, doi: 10.1109/TWC.2014.2331051.

[5] Y. Li, C. Liao, Y. Wang, and C. Wang, "Energy-efficient deployment and adaptive sleeping in heterogeneous cellular networks," IEEE Access, vol. 7, pp. 35838–35850, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2904621.

[6] W. Lee, H. Lee, and H.-H. Choi, "Deep learning-based network-wide energy efficiency optimization in ultra-dense small cell networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, no. 6, pp. 8020–8034, Jun. 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3246832.

[7] L. Su, C. Yang, and J. Yang, "Energy-efficient base-stations sleep-mode techniques in green cellular networks: A survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 2, pp. 803–826, Second Quarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2014.2387695.

[8] A. P. Bianzino, C. Chaudet, D. Rossi, and J.-L. Rougier, "A survey of green networking research," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 1, pp. 3–20, First Quarter 2012, doi: 10.1109/SURV.2011.113010.00106.

[9] C. Peng et al., "System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks," IEEE Network, vol. 29, no. 2, pp. 6–14, Mar./Apr. 2015, doi: 10.1109/MNET.2015.7064895.

[10] S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad, and M. Debbah, "Federated learning for ultra-reliable low-latency V2V communications," in Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Waikoloa, HI, USA, 2019, pp. 1–7, doi: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9014106.

[11] M. A. Albreem, A. H. Al Habbash, A. M. Abu-Hudrouss, and S. S. Ikki, "Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks," IEEE Access, vol. 8, pp. 134210–134251, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3010276.

[12] J. G. Andrews et al., "What will 5G be?," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014, doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098.

[13] D. Liu, L. Wang, Y. Chen, M. Elkashlan, K.-K. Wong, and R. Schober, "User association in 5G networks: A survey and an outlook," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 1018–1044, Second Quarter 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2516538.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3 - Autumn 2025

[14] E. Hossain, M. Rasti, H. Tabassum, and A. Abdelnasser, "Evolution toward 5G multi-tier cellular wireless networks: An interference management perspective," IEEE Wireless Communications, vol. 21, no. 3, pp. 118–127, Jun. 2014, doi: 10.1109/MWC.2014.6845056.

[15] A. Ghosh et al., "Heterogeneous cellular networks: From theory to practice," IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 6, pp. 54–64, Jun. 2012, doi: 10.1109/MCOM.2012.6211486.

[16] T. Q. S. Quek, G. de la Roche, I. Güvenç, and M. Kountouris, Small Cell Networks: Deployment, PHY Techniques, and Resource Management. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2013.

[17] M. Kamel, W. Hamouda, and A. Youssef, "Ultra-dense networks: A survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 4, pp. 2522–2545, Fourth Quarter 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2571730.

[18] F. Salahdine, J. Opadere, Q. Liu, T. Han, N. Zhang, and S. Wu, "A survey on sleep mode techniques for ultra-dense networks in 5G and beyond," Computer Networks, vol. 201, Dec. 2021, Art. no. 108567, doi: 10.1016/j.comnet.2021.108567.

[19] C. Wang et al., "Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks," IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 122–130, Feb. 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736752.

[20] 3GPP, "Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)," 3GPP, Sophia Antipolis, France, Tech. Rep. TR 36.814, Mar. 2017. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/36_series/36.814/.

زیرنویس‌ها:

1. Styles
2. Layout
3. Particle swarm optimization
4. Paragraph
5. Page layout
6. Equation editor

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.555]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025