

## تخصیص منابع با هدف برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی کاربران در شبکه‌های مخابراتی با قابلیت برداشت انرژی بی‌سیم

جواد واحدیان آکندی<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ سید مهدی حسینی اندارگلی<sup>۲</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - javadvahedian@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - smh\_andargoli@nit.ac.ir

**چکیده:** در این پژوهش سعی خواهد شد بهره‌وری انرژی توسط تخصیص منابع در سیستم‌های مخابراتی که انرژی بی‌سیم دریافت می‌کنند (WPCN) مورد بررسی قرار گیرد. در سناریو مورد مطالعه، چندین کاربر ابتدا از ایستگاه توان، انرژی دریافت می‌کنند و سپس به ایستگاه دریافت اطلاعات، ارسال اطلاعات انجام می‌دهند. هدف برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی کاربرها است در حالی که حداقل گذردهی برای کاربرها تضمین شود و قیدهای برداشت انرژی برآورده گردد. منظور از برقراری عدالت این است که تخصیص منابع در شبکه به گونه‌ای انجام گیرد، تا بهره‌وری انرژی کاربری که کمترین مقدار را دارا است، حداکثر گردد. متغیرهای مسئله تعریف شده در این مقاله، زمان‌بندی دریافت انرژی و زمان‌بندی ارسال اطلاعات در هر کاربر و میزان توان اختصاص یافته به هر کاربر جهت ارسال اطلاعات است که در کارهای قبلی به صورت توأم مورد توجه قرار نگرفته‌اند. مسئله مورد نظر ذاتاً یک مسئله غیرمحدب و بدرفتار است که نوآوری‌های زیادی جهت ساده‌سازی مسئله بکار گرفته شده و اثبات‌های مختلف ریاضی برای دستیابی به جواب ارائه گردید. برای حل مسئله ساده‌سازی شده، یک الگوریتم تکراری با پیچیدگی به‌مراتب کمتر از الگوریتم‌های جستجوی فراگیر ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی WPCN، فاصله بهره‌وری انرژی کاربران را حداقل می‌نماید به گونه‌ای که بهره‌وری انرژی همه کاربران یکسان شده و درعین حال به بیشترین مقدار ممکن خواهند رسید.

**واژه‌های کلیدی:** بهره‌وری انرژی، برداشت انرژی بی‌سیم، تخصیص توان و زمان، WPCN.

## Resources Allocation based on Fair Energy Efficiency in Wireless Powered Communications Network

J. Vahedian Akandi<sup>1</sup>, M.Sc Student; S. M. Hosseini Andargoli<sup>2</sup>, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran,  
Email: javadvahedian@gmail.com

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran,  
Email: smh\_andargoli@nit.ac.ir

**Abstract:** In this paper, we will try to examine the energy efficiency by allocating resources in wireless powered communications networks (WPCNs). In this study, the several users initially receive energy from the power station and then communicate with the information station. This paper deals with the fairness on the user's energy efficiency while ensuring minimum throughput for users and fulfilling the energy harvesting power constraints. The problem variables are the timing between receiving energy and sending information per user, and the transmit power of each user, whereas in the previous works, it has not been considered as joint allocation. Due to the non-convex nature of the problem, the some simplifications are used for solving it. In order to solve simplified problem, we present an innovative iterative algorithm with far less complexity than exhaustive search algorithms. Simulation results indicate that the proposed method provides better energy efficiency than other WPCN optimization methods and the only time allocation method. Also, the presented algorithm balances the energy efficiency among users and simultaneously guarantees the minimum rate required for each user.

**Keywords:** Energy Efficiency, Wireless energy harvesting, Power and Time Allocation, WPCN.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۴/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۸/۲۷ و ۱۳۹۷/۹/۲۰ و ۱۳۹۸/۲/۱۰ و ۱۳۹۸/۳/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۵/۱

نام نویسنده مسئول: سید مهدی حسینی اندارگلی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بابل - خیابان شریعتی - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

## ۱- مقدمه

مقاله [۶] به موضوع تخصیص منابع در سیستم‌های مخابراتی تغذیه شده

به صورت بی‌سیم، جهت کمینه کردن تأخیر ارسال می‌پردازد. در این مقاله نویسنده سیستم را به صورت یک ایستگاه مرکزی و یک گره در نظر گرفته و مجموع زمان ارسال توان از ایستگاه مرکزی و همچنین زمان ارسال اطلاعات گره را کمینه کرده است، تا اطلاعات با کمترین تأخیر از گره به ایستگاه مرکزی فرستاده شود. با توجه به اینکه در این مقاله تنها یک گره در سیستم فرض شده است، معاوضه‌ای بین زمان ارسال اطلاعات کاربران و همچنین میزان توان تخصیص یافته به کاربران جهت دستیابی به یک سیستم انرژی کارآمد وجود ندارد.

با توجه به افزایش تعداد دستگاه‌های متصل به شبکه، هزینه‌های انرژی، ملاحظات مدیریت منابع مصرفی و نگرانی‌هایی که بابت انتشار CO<sub>2</sub> از لحاظ محیط‌زیست وجود دارد، بهره‌وری انرژی به عنوان یک معیار مهم طراحی برای سیستم‌های مخابراتی نسل آینده مورد توجه قرار گرفته است. از آنجاکه WET نیز یکی از کاندیداهای مهم برای تأمین انرژی خیلی از سیستم‌های مخابراتی نسل آینده است، بررسی بهره‌وری انرژی در این نوع شبکه‌ها دارای اهمیت دوچندان خواهد بود. برای اولین بار در [۷] تخصیص منابع در WPCN با تابع هدف بهره‌وری انرژی سیستم مورد بررسی قرار گرفت و منابع سیستم با هدف بیشینه کردن مجموع بهره‌وری انرژی کاربران سیستم اختصاص داده شد. همچنین نویسندگان این مقاله در [۸] حداکثر کردن جمع وزنی بهره‌وری انرژی کاربران را مدنظر قرار دادند، اما در هیچ‌کدام از این مسائل نمی‌توان مطمئن بود که بدترین کاربر نیز بهره‌وری انرژی قابل‌قبولی داشته باشد. در [۹] از بهینه‌سازی تخصیص زمان، برای ایجاد عدالت در بهره‌وری انرژی کاربران یک شبکه استفاده شده است اما توان اختصاصی به کاربران به عنوان یک پارامتر مستقل در مسئله بهینه‌سازی وارد نشده است.

در [۱۰] به موضوع حداکثر کردن بهره‌وری انرژی حسگرها بر پایه طرح دسترسی چندگانه غیرمتعامد (NOMA<sup>۱</sup>) پرداخته شده است. با توجه به ماهیت غیرخطی و کسری بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی، نویسندگان، بر ساده‌سازی مسئله مطرح شده، دو لم را اثبات می‌کنند. در ادامه برای به دست آوردن جواب‌های بهینه مسئله ساده شده، الگوریتمی بر مبنای بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO<sup>۲</sup>) پیشنهاد می‌دهند، که این الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌های عددی سریع‌تر همگرا شده و پایداری بهتری نیز در شبیه‌سازی‌ها از خود نشان می‌دهد.

در مقاله [۱۱] به موضوع حداکثر کردن بهره‌وری انرژی وزنی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم متحرک (موبایل) بر مبنای SWIPT پرداخته شده است. الگوریتم تخصیص منابع پیشنهادی در این مقاله در دو طرح ارائه شده است. در طرح اول، توان دریافت شده از رله‌ها به یک مجموعه پیوسته با نسبت تقسیم دلخواه، تقسیم می‌شوند. در طرح دوم، توان دریافتی به مجموعه‌ای گسسته‌ای از توان با نسبت تقسیم

امروزه مصرف انرژی در سیستم‌های مخابراتی، یکی از چالش‌های مهم پیش روی مخابرات نوین است. اخیراً توجه زیادی به فناوری‌های برداشت انرژی در شبکه‌های مخابراتی شده است و برخی مطالعات، برداشت انرژی از منابع تجدید پذیر طبیعی مانند انرژی خورشیدی و باد را بررسی کرده‌اند. با این حال به خاطر ماهیت متناوب و غیرقابل پیش‌بینی که این منابع دارند، مقدار انرژی دریافت شده ممکن است کافی نباشد و این یک موضوع مهم و بحرانی برای کاربردهایی است که کیفیت خدمات در آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. همچنین عمر محدود باتری دستگاه‌ها همیشه به عنوان یک فرض کلیدی در طراحی فناوری‌های بی‌سیم در نظر گرفته می‌شود. تعویض یا شارژ مجدد باتری به طور مرتب اغلب هزینه زیادی را مخصوصاً در کاربردهایی که تعداد دستگاه‌ها زیاد است منجر می‌شود و حتی در برخی کاربردهای مهم (مانند دستگاه‌های پزشکی ایمپلنت شده، بدن انسان، تونل‌های معادن و کاربردهای زیرزمینی) این کار شدنی نیست.

از طرف دیگر ثابت شده است که برداشت انرژی از سیگنال‌های رادیو فرکانسی نیز امکان‌پذیر است، که به عنوان انتقال انرژی بی‌سیم (WET<sup>۱</sup>) بی‌سیم (WET<sup>۱</sup>) شناخته شده است. تحقیقات ابتدایی صورت گرفته در انتقال انرژی بی‌سیم، بر کاربردهای میدان دور و با توان بالا تمرکز داشتند، اما به دلیل بهره‌وری پایین و نگرانی‌های پزشکی که در مورد کاربردهای با توان بالا وجود داشت، ادامه پیدا نکردند. بنابراین تحقیقات اخیر تمرکز بر حالت میدان نزدیک و همچنین میدان دور با توان پایین دارند [۱]. با استفاده از خاصیت تابشی میدان دور امواج الکترومغناطیسی، گیرنده‌های بی‌سیم می‌توانند انرژی را از فرستنده انرژی از راه دور و از طریق سیگنال‌های رادیو فرکانسی دریافت نمایند و می‌توان انتقال داده و انتقال انرژی را در دستگاه‌های بی‌سیم، با هم در نظر گرفت. در نتیجه این عمل، دو بحثی که در انتقال انرژی بی‌سیم مورد مطالعه قرار گرفتند، SWIPT<sup>۲</sup> و WPCN<sup>۳</sup> می‌باشند [۲]، [۳].

همان‌طور که گفته شد، علاوه بر SWIPT که کاربردهای فراوانی در مخابرات نوین و شبکه‌های حسگر بی‌سیم دارد (به دلیل قابلیت ارسال هم‌زمان اطلاعات و توان در سیستم‌های مبتنی بر برداشت انرژی) [۴]، یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مورد توجه در WET، شبکه‌های مخابراتی با قابلیت برداشت انرژی بی‌سیم (WPCN) می‌باشد. اخیراً این سیستم‌ها به دلیل کاربردهای زیادی که می‌توانند در شبکه‌های حسگر بی‌سیم و اینترنت اشیا داشته باشند توجه زیادی را به خود جلب کرده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای اولین بار در سال ۲۰۱۴ و در [۵] مسئله بهینه‌سازی تخصیص زمان برای حداکثرسازی گذردهی کاربران و سیستم در یک شبکه WPCN مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله فرض شده است که کاربران برای دریافت انرژی و ارسال اطلاعات از پروتکل برداشت و سپس ارسال استفاده می‌کنند.

۲ - در نظر گرفتن مدل سیستم عملی تر، با در نظر گرفتن تلفات در مدارات برداشت انرژی و انتقال توان، برخلاف تعداد زیادی از مقالات که از این تلفات صرف نظر می کنند.

۳ - در این پژوهش، به موضوع تخصیص توان و زمان به صورت توأم پرداخته شده است، این در حالی است که تا به حال مقالاتی که در زمینه برقراری عدالت بین کاربران به لحاظ بهره‌وری انرژی پرداخته‌اند، تنها به موضوع تخصیص زمان پرداخته شده است. در حالی که با تنظیم هر دو پارامتر توان و زمان نشان خواهیم داد، با توجه به درجه آزادی بیشتری که برای حل مسئله به وجود می‌آید، بهره‌وری انرژی نسبت به تخصیص زمان تنها بهبود خواهد داشت.

۴ - بررسی چالش حل مسئله تخصیص توأم زمان و توان به کاربران و ارائه راه‌حلی مبتنی بر بهینه‌سازی محدب که جواب به صورت یک الگوریتم تکراری پیشنهاد گردید، به طوری که در داخل آن تخصیص توان به فرم بسته انجام می‌شود. علاوه بر این برای ساده‌سازی الگوریتم تخصیص زمان و توان، پیشنهاد جداسازی مسئله تخصیص توان و زمان ارائه گردید. نوآوری پیشنهادی به گونه‌ای است که هنگام همگرا شدن توأم پاسخ دو مسئله در دل الگوریتم تکراری، تاثیر جواب هر مسئله روی جواب مسئله دیگر، لحاظ شده است. علاوه بر این پیچیدگی الگوریتم پیشنهادی استخراج شده است که نسبت به تعداد کاربران خطی و مناسب برای کارهای عملی است. همچنین همگرایی الگوریتم و محدود فضای جستجو نیز به صورت ریاضی تحلیل شده است.

۵ - به صورت ریاضی اثبات شده است که جواب بهینه تخصیص توان و زمان به گونه‌ای است که بهره‌وری انرژی همه کاربران به ازای تخصیص بهینه توان و زمان با هم برابر خواهد شد.

در ادامه، در بخش ۲ مدل سیستم و روابط مورد نیاز برای تعریف مسئله بهینه‌سازی مرور خواهد شد و در بخش ۳ مسئله متعادل‌سازی بهره‌وری انرژی کاربران برای شبکه WPCN فرموله شده و جوانب آن بررسی می‌گردد. در بخش ۴ روش پیشنهادی برای حل مسئله ارائه می‌گردد و در بخش ۵ کارایی روش پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش ۶ مقاله جمع‌بندی شده و در پیوست مقاله، اثبات بعضی از قضایا و روابط آورده شده است.

## ۲ مدل سیستم

برای یک شبکه WPCN، فرض می‌کنیم مطابق شکل ۱ کاربران، توان را از یک ایستگاه فرستنده با توان  $(P_0)$  دریافت می‌کنند و اطلاعات ارسالی خود را به یک ایستگاه گیرنده اطلاعات که با فرستنده توان هم‌مکان نیست (برای کاهش اثر پدیده دور- نزدیک مضاعف) می‌فرستند. K کاربر، اطلاعات خود را به صورت TDMA، در یک باند

ثابت، تقسیم می‌شود. در هر دو طرح، مسئله بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی وزنی به صورت یک مسئله غیرمحدب، فرمول‌بندی می‌شود. نویسندگان، برای حل این مسئله، بر مبنای برنامه‌ریزی کسری و تجزیه دوگانه، یک الگوریتم چندلایه متشکل از زیرالگوریتم‌های کنترل نرخ، تخصیص توان و تقسیم توان پیشنهاد می‌دهند، که با تعداد کمی تکرار، به همگرایی می‌رسد.

این مقاله، به موضوع برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی کاربران شبکه می‌پردازد. به طور معمول، اگر تخصیص منابع، برای بهینه‌سازی مجموع بهره‌وری انرژی کاربران، مورد توجه قرار گیرد، این امکان وجود خواهد داشت، با وجود بهینه‌شدن بهره‌وری انرژی شبکه، کاربری به دلایلی همچون تضعیف و تلفات زیاد در کانال، از بهره‌وری انرژی کمی برخوردار گردد. حال در این مقاله، سعی خواهیم کرد، تخصیص منابع در شبکه به گونه‌ای انجام گردد، که کاربری با بدترین وضعیت بهره‌وری نیز بتواند بهره‌وری انرژی مناسبی داشته باشد و عدالت بین کاربران برقرار گردد. همچنین با توجه به تضعیف بالایی که در انتقال انرژی بی‌سیم رخ می‌دهد، WET اساساً برای کاربردهایی که توان پایینی نیاز دارند استفاده می‌شود و استفاده بهینه از انرژی دریافت شده از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین در این تحقیق تخصیص منابع به صورت تخصیص توأم مدت‌زمان دریافت انرژی، مدت‌زمان ارسال اطلاعات هر کاربر و تخصیص توان ارسال اطلاعات هر کاربر پیشنهاد می‌گردد، تا علاوه بر تخصیص زمان، کاربران بتوانند از توان محدودی که در اختیار دارند به صورت بهینه برای ارسال اطلاعات استفاده کنند. مسئله بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی ذاتاً یک مسئله غیر محدب و غیرخطی است که با اضافه شدن متغیر بهینه‌سازی توان حل آن پیچیده‌تر نیز خواهد شد. در ادامه با ارائه قضایا و لم‌های مختلف سعی خواهد شد مسئله را به شکل ساده‌تر و قابل‌حل تبدیل نماییم. در روش حل پیشنهادی مسئله تخصیص توان و تخصیص زمان به ازای مقدار بهره‌وری مختلف که خود در حال همگرایی به مقدار بهینه است از هم جدا شده در حالی که اثرات تخصیص هر کدام بر روی تخصیص دیگری لحاظ شده است.

برای زیر مسئله تخصیص توان یک جواب به فرم بسته ارائه خواهیم کرد در حالی که برای حل مسئله تخصیص زمان از الگوریتم عددی سد یا بریر<sup>۱</sup> استفاده می‌نماییم.

با توجه به توضیحات گفته شده در بالا، به‌طور کلی ویژگی‌ها و نوآوری‌های این مقاله را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱ - برقراری عدالت بین کاربران به لحاظ بهره‌وری انرژی، که تعداد بسیار کمی مقالات به آن پرداخته‌اند. بیشتر مقالات موجود، به موضوع بهینه‌کردن بهره‌وری انرژی شبکه (یا همان بهینه‌کردن مجموع بهره‌وری انرژی کاربران) پرداخته‌اند.

$$EH_i = \eta_i P_0 \tau_0 h_i \quad (4)$$

که در آن  $\eta_i$  بازده تبدیل انرژی و  $P_0$  توان ارسال شده توسط ایستگاه توان می‌باشد. در این مقاله، کانال‌های WET و WIT با محوشدگی کند و به ترتیب با محوشدگی رایس با فاکتور رایس  $\gamma$  dB و محوشدگی رایلی مدل می‌شوند. همچنین مدل تضعیف مسیر برای هر دو کانال یکسان و با نمای تضعیف مسیر  $\alpha$  در نظر گرفته می‌شود. (در ضمن در این مقاله از اثر سایه صرف نظر شده است).

حال با تعریف پارامترهای مهم در شبکه WPCN، در بخش بعدی می‌توانیم مسئله برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی با تضمین حداقل نرخ مورد نیاز کاربران را برای یک شبکه WPCN که محدودیت‌های خاص خود را دارد، تعریف نماییم.

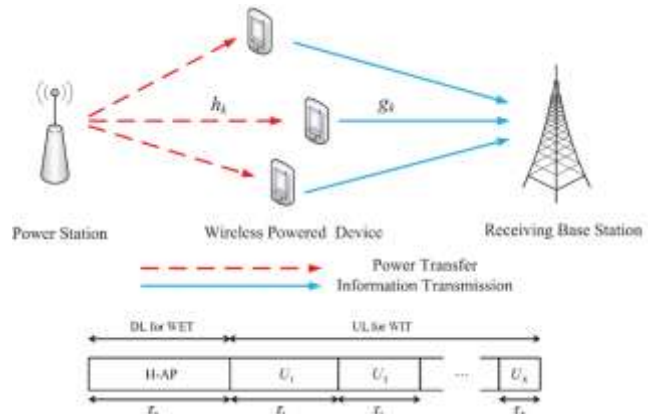
### ۳ مسئله برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی کاربران در WPCN

در این بخش قصد داریم، با تخصیص مناسب بازه‌های زمانی TDMA و همچنین توان مناسب به هر کاربر، کمترین بهره‌وری انرژی بین کاربران شبکه را بیشینه نماییم به گونه‌ای که محدودیت‌های شبکه WPCN رعایت شود و حداقل نرخ مورد نیاز کاربران تضمین گردد. اگر برای بهینه کردن بهره‌وری انرژی شبکه، مجموع بهره‌وری انرژی کاربران را بیشینه کنیم، در این صورت، ممکن است با وضعیتی روبه‌رو گردیم، که کاربری تحت شرایطی، بهره‌وری آن پایین باشد، ولی سایر کاربران در وضعیت بهتری به لحاظ بهره‌وری انرژی قرار داشته باشند. بنابراین ما در این مقاله، از معیار max-min برای برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی کاربران استفاده خواهیم کرد. در این مسئله بهینه‌سازی، هدف بیشینه کردن بهره‌وری انرژی کاربری است که کمترین مقدار بهره‌وری انرژی را داراست و این کار با تخصیص توأم توان و زمان به کاربران انجام می‌گیرد، موضوعی که مقالات دیگر کمتر به آن پرداخته‌اند. برنامه‌ریزی بر اساس حداکثرسازی بهره‌وری کاربری که وضعیت بدی دارد، خودبه‌خود به بهبود عدالت در بین کاربران شبکه منجر خواهد شد.

$$\begin{aligned} \max_{p, \tau} \min_i \frac{R_i(\tau, p)}{E_i(\tau, p)} \\ \text{subject to: } \tau_0 + \sum_{i=1}^k \tau_i = T, \quad \tau_i \geq 0 \quad \forall i \quad (C_1) \\ \tau_0 P_{cr} + \tau_i P_i + \tau_i P_c \leq \eta_i P_0 \tau_0 h_i, \quad \forall i \quad (C_2) \\ \tau_i \log_2(1 + \gamma_i p_i) \geq R_{min}^i, \quad \forall i \quad (C_3) \end{aligned} \quad (5)$$

در مسئله (۵)،  $\tau = [\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_k]$  و  $p = [p_1, p_2, \dots, p_k]$  به ترتیب معرف بردار زمان‌های اختصاص یافته و توان‌های اختصاص یافته به‌عنوان خروجی مسئله می‌باشند. همچنین قید  $C_1$ ، اشاره به مجموع زمان اختصاص یافته برای برداشت انرژی و ارسال اطلاعات کاربران در هر بلوک زمانی دارد. قید  $C_2$  نیز حداکثر انرژی مصرفی برای هر کاربر را مشخص می‌کند. سمت راست این نامساوی طبق (۴) همان انرژی برداشت شده هر کاربر از ایستگاه توان، و سمت چپ نامساوی نشان

فرکانسی یکسان و با پروتکل "برداشت و سپس ارسال" به ایستگاه دریافت اطلاعات می‌فرستند. نحوه عملکرد این پروتکل نیز به این صورت است که تمامی کاربران ابتدا در یک بازه زمانی  $\tau_0$ ، انرژی را از ایستگاه توان دریافت می‌کنند و سپس با استفاده از انرژی برداشت شده، هر کاربر مانند کاربر  $i$ ام، اطلاعات خود را در بازه زمانی اختصاصی خود مانند  $\tau_i$  ارسال می‌کند و بازه‌های زمانی ارسال اطلاعات کاربران با یکدیگر اشتراک ندارند.



شکل ۱: مدل سیستم WPCN با TDMA [۱۲]

بهره توان کانال فرسو بین کاربر  $i$ ام و ایستگاه توان،  $h_i$  و بهره توان کانال فراسو بین کاربر  $i$ ام و ایستگاه دریافت اطلاعات  $g_i$  فرض می‌شوند. بنابراین می‌توان گذردهی کاربر  $i$ ام را به صورت زیر نوشت:

$$R_i = W \tau_i \log_2 \left( 1 + \frac{g_i P_i}{\sigma^2} \right) \quad (1)$$

که در آن  $p_i$  توان ارسالی کاربر  $i$ ام،  $\sigma^2$  توان نویز حرارتی و  $W$  پهنای باند سیگنال اطلاعات می‌باشند. همچنین می‌توان انرژی مصرفی هر کاربر را به صورت زیر نوشت:

$$E_i = \tau_0 P_{cr} + \tau_i P_i + \tau_i P_c \quad (2)$$

که  $p_{cr}$  توان مداری تلف شده در دستگاه‌های بی‌سیم هنگام برداشت انرژی و  $p_c$  توان مداری تلف شده در دستگاه‌ها هنگام ارسال اطلاعات می‌باشد. بنابراین با تعریف  $\gamma_i = \frac{g_i}{\sigma^2}$  می‌توان تابع بهره‌وری انرژی هر کاربر مانند کاربر  $i$ ام را طبق رابطه (۳) نوشت:

$$EE_i = \frac{\tau_i \log_2(1 + \gamma_i p_i)}{\tau_0 P_{cr} + \tau_i P_i + \tau_i P_c} \quad (3)$$

دقت شود که در رابطه بالا، با توجه به اینکه  $W$  یک مقدار ثابت برای تمام کاربران است، از صورت رابطه (۳) حذف شده است، بنابراین در این مقاله از این پس بهره‌وری انرژی را بر حسب bits/Joule/Hz و همچنین گذردهی به‌عنوان صورت کسر را بر حسب bits/Hz در نظر می‌گیریم. حال در صورتی که زمان برداشت انرژی و ارسال اطلاعات کاربران را در یک بلوک زمانی  $T$  در نظر بگیریم، می‌توان انرژی برداشت شده توسط دستگاه‌ها در بازه زمانی  $T$  را به صورت زیر در نظر گرفت:

که نشان می‌دهد  $\bar{p}$  و  $\bar{\tau}$  جواب بهینه مسئله اصلی (۵) نیز می‌باشد، بنابراین قضیه ثابت شد.

با تعریف تابع  $\phi(y) = \max_{\tau, p} \min_i [R_i(\tau, p) - yE_i(\tau, p)]$  در ادامه، می‌توانیم  $\phi(y)$  نسبت به  $y$  یک تابع اکیداً نزولی است.

**لم ۱:** تابع  $\phi(y)$  نسبت به  $y$  یک تابع اکیداً نزولی است.

**اثبات:** به پیوست ۱ مراجعه شود.

با توجه به اینکه  $\phi(y)$  یک تابع یکنوا از  $y$  است، برای به دست آوردن ریشه معادله  $\phi(y) = 0$  می‌توانیم با استفاده از یک الگوریتم عددی ساده مانند الگوریتم نصف کردن<sup>۱۱</sup>، مقدار  $y$  را به گونه‌ای تعیین کنیم

که تابع  $\phi(y) = \max_{\tau, p} \min_i [R_i(\tau, p) - yE_i(\tau, p)]$  برابر با صفر گردد. این مستلزم آن است که در هر تکرار در الگوریتم نصف کردن، مسئله بهینه‌سازی (۶) حل گردد. اگرچه مسئله (۶) نسبت به متغیرهای توأم زمان و توان محدب نیست اما خوشبختانه نسبت به هر یک از متغیرهای زمان و توان به صورت جداگانه یک مسئله بهینه‌سازی محدب می‌باشد. بنابراین برای اینکه مسئله از طریق روش‌های استاندارد مانند بهینه‌سازی محدب قابل حل باشد، مسئله (۶) را به دو زیر مسئله تخصیص توان و تخصیص زمان تقسیم می‌نماییم که هر کدام جداگانه و در امتداد هم حل شده، به گونه‌ای که خروجی‌های هر زیر مسئله به‌عنوان ورودی زیر مسئله دیگر در یک الگوریتم تکراری قرار می‌گیرد و خروجی‌های دو مسئله با هم به جواب بهینه همگرا می‌شوند. (برای اثبات به پیوست ۲ مراجعه شود)

#### ۴- تجزیه و تحلیل مسئله و روش پیشنهادی

##### ۴-۱ حل زیر مسئله تخصیص توان

همان‌طور که در بخش قبلی توضیح داده شد، برای حل مسئله برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی کاربران باید مسئله اصلی را به دو زیر مسئله تقسیم کنیم. در این بخش مسئله تخصیص توان بررسی می‌شود، با فرض اینکه به کاربران از قبل زمان مشخصی اختصاص داده شده است. اگر مسئله (۶) را با محوریت متغیر توان بازنویسی کنیم، داریم:

$$\begin{cases} \max_p \min_i [R_i(p) - yE_i(p)] \\ \text{subject to: } 0 \leq p_i, & \forall i \quad (C_1) \\ \tau_0 p_{cr} + \tau_i p_i + \tau_i p_c \leq \eta_i P_0 \tau_0 h_i, & \forall i \quad (C_2) \\ \tau_i \log_2(1 + \gamma_i p_i) \geq R_{i, \min}^i, & \forall i \quad (C_3) \end{cases} \quad (12)$$

با تعریف  $S = \min_i [R_i(p) - yE_i(p)]$  مسئله max-min

بالا را به یک مسئله ساده شده با قید اضافی به صورت زیر تبدیل کرد:

$$\begin{cases} \max_{(p_i) \geq s} s \\ C_1, C_2, C_3 \\ \tau_i \log_2(1 + \gamma_i p_i) - y(\tau_0 p_{cr} + \tau_i p_i + \tau_i p_c) \geq S, \forall i \quad (C_4) \end{cases} \quad (13)$$

دهنده انرژی مصرفی هر کاربر می‌باشد.  $C_3$  هم قید کیفیت سرویس مسئله می‌باشد که در آن  $R_{i, \min}^i$  حداقل گذردهی تضمین شده برای کاربر  $i$ ام است.

به خاطر ماهیت کسری<sup>۱۲</sup> بودن تابع بهره‌وری انرژی و همچنین درهم‌تنیدگی<sup>۱۳</sup> متغیرهای بهینه‌سازی، مسئله (۵) یک مسئله غیر محدب می‌باشد و حل مستقیم آن با روش‌های استاندارد امکان‌پذیر نیست. برای حل این مشکل، با استفاده از قضیه ۱، که در ادامه می‌آید، مسئله (۵) را که یک مسئله بهینه‌سازی کسری است، می‌توانیم به مسئله بهینه‌سازی ساده شده زیر تبدیل کنیم.

$$\begin{aligned} & \max_{\tau, p} \min_i [R_i(\tau, p) - yE_i(\tau, p)] \\ & \text{subject to: } (C_1), (C_2), (C_3) \end{aligned} \quad (6)$$

همان‌طور که گفته شد در اینجا با توجه به کسری بودن مسئله لازم است که مسئله برای حل به شکل معادل آن تبدیل شود، در اینجا  $p^*$  و  $\tau^*$  را به ترتیب تخصیص توان بهینه، تخصیص زمان بهینه و بهره‌وری انرژی بهینه تعریف می‌کنیم و همچنین  $D$  را ناحیه شدنی<sup>۱۴</sup> مسئله در نظر می‌گیریم که قیدها را برآورده می‌کند.

**قضیه ۱:** حل بهینه  $p^*$  و  $\tau^*$  برای مسئله اصلی (۵) به دست می‌آید اگر و تنها اگر:

$$\begin{aligned} & \max_{\tau, p \in D} \min_i [R_i(\tau, p) - y^* E_i(\tau, p)] = \\ & \min_i [R_i(\tau^*, p^*) - y^* E_i(\tau^*, p^*)] = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

**اثبات:** برای اثبات قضیه، شرط کافی و لازم را اثبات می‌کنیم [۱۳]:

برای شرط لازم فرض می‌کنیم  $(\tau^*, p^*)$  جواب بهینه و  $(\tau, p)$  هر جواب شدنی مسئله (۵) باشد، بنابراین داریم:

$$y^* = \min_i \frac{R_i(\tau^*, p^*)}{E_i(\tau^*, p^*)} \geq \min_i \frac{R_i(\tau, p)}{E_i(\tau, p)} \quad (8)$$

معادله بالا را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} & \min_i [R_i(\tau^*, p^*) - y^* E_i(\tau^*, p^*)] = 0 \\ & \min_i [R_i(\tau, p) - y^* E_i(\tau, p)] \leq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

که نشان می‌دهد  $p^*$  و  $\tau^*$  حل بهینه برای معادله (۷) نیز می‌باشد. برای اثبات شرط کافی فرض می‌کنیم  $(\tilde{\tau}, \tilde{p})$  و  $(\tau, p)$  به ترتیب حل بهینه و هر جواب شدنی برای مسئله (۶) باشند، در این صورت داریم:

$$\begin{aligned} & \min_i [R_i(\tau, p) - y^* E_i(\tau, p)] \leq \\ & \min_i [R_i(\tilde{\tau}, \tilde{p}) - y^* E_i(\tilde{\tau}, \tilde{p})] = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

با بازنویسی معادله بالا داریم:

$$y^* = \min_i \frac{R_i(\tilde{\tau}, \tilde{p})}{E_i(\tilde{\tau}, \tilde{p})}, \quad y^* \geq \min_i \frac{R_i(\tau, p)}{E_i(\tau, p)} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \max_{\tau} \min_i [R_i(\tau) - yE_i(\tau)] \\ \tau_0 + \sum_{i=1}^k \tau_i = 1 & (C_1) \\ \tau_0 p_{cr} + \tau_i p_i + \tau_i p_c \leq \eta_i P_0 \tau_0 h_i, \forall i & (C_2) \\ \tau_i \log_2(1 + \gamma_i p_i) \geq R_{min}^i, \forall i & (C_3) \end{cases} \quad (15)$$

با تبدیل مسئله بالا به یک مسئله ماکزیمم‌سازی با قید اضافی داریم:

$$\begin{cases} \max_{(p_i), s} s \\ C_1, C_2, C_3 \\ \tau_i \log(1 + \gamma_i p_i) - y(\tau_0 p_{cr} + \tau_i p_i + \tau_i p_c) \geq S, \forall i & (C_4) \end{cases} \quad (16)$$

با توجه به خطی بودن تابع هدف و تمامی قیدها نسبت به متغیرهای زمان، مسئله (۱۶) محدب و از نوع مسئله برنامه‌ریزی خطی می‌باشد. در اینجا باید به این نکته اشاره کرد که با وجود این که مسئله (۱۶) محدب است، اما چون تابع هدف و قیدها نسبت به  $\tau_0$ ،  $\tau_i$  و  $S$  خطی هستند، ناحیه شدنی مسئله از تقاطع صفحات قیدها به دست می‌آید. ولی چون تعداد قیدها زیاد است با نوشتن تابع لاگرانژین و شرایط KKT نمی‌توان به یک جواب بسته رسید، بنابراین برای به دست آوردن زمان بهینه اختصاص یافته به هر کاربر از الگوریتمی زمانی<sup>۱۳</sup> همانند بریر(Barrier) برای حل مسئله (۱۶) استفاده می‌کنیم. لازم به ذکر است اساس روش بریر بر این است که با ایجاد یک سد(مانع) در حاشیه ناحیه شدنی مسئله، از خارج شدن الگوریتم بهینه‌سازی از این ناحیه جلوگیری می‌کند و به جای حل یک مسئله مقید، دنباله‌ای از مسائل نامقید از طریق الگوریتم عددی گرادیان حل می‌شود [۱۴].

#### ۴-۴ مسئله تخصیص توأم توان و زمان

بعد از آن که در دو بخش قبلی، بهینه‌سازی مسئله تخصیص توان و سپس مسئله تخصیص زمان را بررسی کردیم، اکنون با استفاده از قضیه ۱، ۲، ۱ و همچنین قضیه همگرایی و الگوریتم نصف کردن، می‌توان تخصیص توأم توان و زمان (JTPA<sup>۱۴</sup>) را برای برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی کاربران در WPCN، با استفاده از الگوریتم زیر به دست آورد.

#### JTPA Algorithm

```

Set initial points
Set  $y_{min}$  and  $y_{max}$  such that  $y^* \in [y_{min}, y_{max}]$ .
While  $|\varphi(y)| > \epsilon_2$ 
    Update  $y = (y_{min} + y_{max})/2$ 
     $K=1$ 
    While  $|\min(EE^{k+1}) - \min(EE^k)| > \epsilon_1$ 
        Obtain  $p$  from PA algorithm
        Obtain  $\tau$  from TA algorithm based on barrier algorithm
    End(While)
If  $\varphi(y) > 0$  set  $y_{min} = y$ ; else set  $y_{max} = y$ ;
End(if)
    
```

با توجه به خطی بودن تابع هدف و قیدهای  $C_1$  و  $C_2$  و همچنین محدب بودن قیدهای  $C_3$  و  $C_4$  نسبت به متغیرهای بهینه‌سازی، مسئله (۱۳) یک مسئله محدب می‌باشد. تابع  $-log(1 + \gamma_i p_i)$  محدب می‌باشد.

لم ۲: در مسئله (۱۳) تخصیص توان بهینه  $p_i$  برای هر کاربر به مجموعه  $\Gamma$  تعلق دارد، یعنی  $p_i \in \Gamma$  که:

$$\Gamma = \left\{ \left( \frac{1}{y} - \frac{1}{\gamma_i} \right)^+, \frac{1}{\gamma_i} \left( e^{\left( \frac{R_{min}}{\tau_i} \right)} - 1 \right), \frac{(\eta_i P_0 \tau_0 h_i - \tau_0 p_{cr} - \tau_i p_c)}{\tau_i} \right\} \quad (14)$$

اثبات: برای اثبات به پیوست ۳ مراجعه کنید.

از لم ۲ مشخص است که  $p_i$  بهینه یکی از سه توان به دست آمده در  $\Gamma$  می‌تواند باشد. نکته‌ای که در اینجا باید به آن توجه نمود آن است که همان‌طور که در پیوست ۲ به آن اشاره شده، دو تا از توان‌های مجموعه  $\Gamma$  از مرزهای قیدهای  $C_2$  و  $C_3$  به دست می‌آیند. بنابراین  $\Gamma$  لزوماً توانی نیست که بیشترین مقدار را برای تابع هدف مسئله ایجاد نماید، بلکه باید در قیدهای  $C_2$  و  $C_3$  نیز صدق نماید. بنابراین با توضیحات داده شده، الگوریتم خطی تخصیص توان بهینه<sup>۱۴</sup> (PA) را به صورت زیر پیشنهاد می‌دهیم:

#### PA Algorithm

```

Compute  $P_{i1} = \left[ \frac{1}{y} - \frac{1}{\gamma_i} \right]^+$ ,
 $P_{i2} = \frac{(\eta_i P_0 \tau_0 h_i - \tau_0 p_{cr} - \tau_i p_c)}{\tau_i}$ ,  $P_{i3} = \frac{1}{\gamma_i} [exp(\frac{R_{min}}{\tau_i}) - 1] \forall i$ 
For  $i=1$ :
    If  $P_{i1} < P_{i3}$  or  $P_{i1} > P_{i2} \forall i$ 
         $P_{i1} = P_{i2}$ 
    End (If)
End (For)
Compute  $EE(P_{ij}) \forall i, j$ 
Find  $(argmax_j EE(P_{ij})) \forall i$ 
    
```

دقت شود که در شبه کد گفته شده در بالا  $EE$  را به صورت تابع  $EE = \tau_i \log(1 + \gamma_i p_i) - y(\tau_0 p_{cr} + \tau_i p_i + \tau_i p_c)$  در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۴ حل زیر مسئله تخصیص زمان

در بخش قبلی، برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی کاربران را در زیر مسئله تخصیص توان بررسی کردیم. در این بخش زیر مسئله تخصیص زمان بررسی می‌شود، درحالی‌که به کاربران از قبل توان مشخصی که همان جواب مسئله تخصیص توان است اختصاص داده شده است. با بازنویسی مسئله (۶) با محوریت متغیر زمان خواهیم داشت:

بودن مسئله از مرتبه ۱ خواهد بود و در نهایت  $\epsilon$ ، دقت الگوریتم بریر می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه پیچیدگی الگوریتم نصف کردن از مرتبه  $O(\ln(\frac{1}{\epsilon_2}))$  می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور کلی پیچیدگی الگوریتم پیشنهادی تخصیص توأم زمان و توان از مرتبه  $O(\ln(\frac{1}{\epsilon_2}) \times (\ln(\frac{1}{\epsilon_1})((1 + 3T) \log(\frac{B(\tau_i)}{\epsilon}) + K)))$  خواهد بود. این در حالی است که در حل مسئله با الگوریتم‌های بهینه جستجوی فراگیر (گسسته سازی مقادیر توان و زمان و تست همه حالت‌های ممکن در تخصیص برای پیدا کردن بهترین جواب) پیچیدگی از مرتبه نمایی خواهد شد که به مراتب بیشتر از پیچیدگی روش پیشنهادی خواهد بود.

### ۵ ختایج شبیه‌سازی

در این بخش قصد داریم شبیه‌سازی مربوط به حل تخصیص منابع برای بهره‌وری انرژی WPCN را ارائه دهیم. در اینجا مدل سیستم برای شبیه‌سازی را مانند قبل به این صورت فرض می‌کنیم که کاربران، توان را از یک ایستگاه فرستنده توان دریافت می‌کنند ( $P_0$ )، و اطلاعات ارسالی خود را به یک ایستگاه گیرنده اطلاعات که در حالت کلی با فرستنده توان هم‌مکان نیست می‌فرستند. K کاربر اطلاعات خود را به‌صورت TDMA و در یک باند فرکانسی یکسان و با پروتکل "برداشت و سپس ارسال" به ایستگاه دریافت اطلاعات می‌فرستند.

سیستمی را با ۴ کاربر در نظر می‌گیریم که در یک محیط  $10m \times 10m$  پخش شده‌اند و شبیه‌سازی خود را به ازای شرایط مختلف انجام خواهیم داد و بهره‌وری انرژی کاربران را مقایسه خواهیم کرد. پهنای باند سیستم و توان نویز حرارتی به ترتیب،  $20 KHz$  و  $-110dBm$  در نظر گرفته شده است. حداقل گذردهی تضمین شده را برای قید کیفیت سرویس مسئله  $1 bit/Hz$  که معادل  $2 \times 10^4 bit/s$  است، در نظر می‌گیریم. همچنین تلفات هنگام برداشت انرژی و ارسال اطلاعات کاربران، به ترتیب  $3 mW$  و  $5 mW$  فرض می‌شوند [۸].

جدول ۱ مشخصات سیستم و کاربران در شبکه WPCN

$d_1 = [4, 3.5, 5, 7]$	فاصله کاربران از ایستگاه انرژی بر حسب متر
$d_2 = [6, 6.5, 5, 3]$	فاصله کاربران از ایستگاه دریافت اطلاعات بر حسب متر
1 bit/Hz	حداقل گذردهی ( $R_{min}$ )
-110 dBm	توان نویز حرارتی ( $\sigma^2$ )
5 mW	تلفات $P_c$
3 mW	تلفات $P_{cr}$
2.8	نمای افت مسیر ( $\alpha$ )
0.9	ضریب $\eta$

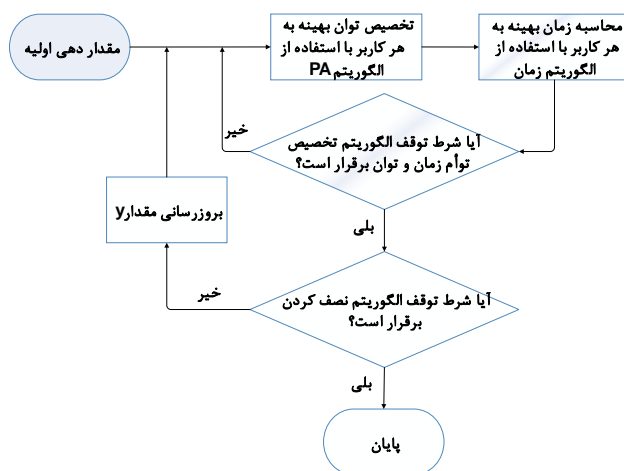
گین توان کانال‌ها  $h_i$  و  $g_i$ ، با استفاده از رابطه  $h_i = \gamma_i d_{1i}^{-\alpha_i}$  و  $g_i = \beta_i d_{2i}^{-\alpha_i}$  و  $\gamma_i$  توان دوم اندازه یک

End (While)

در شبه کد بالا، در حلقه بیرونی الگوریتم، مقدار  $\gamma$  با روش نصف کردن محاسبه می‌شود، و در حلقه داخلی برای هر  $\gamma$ ، تخصیص توان و زمان با استفاده از الگوریتم PA و الگوریتم بریر به دست می‌آید.

در الگوریتم بالا،  $\gamma_{min}$  و  $\gamma_{max}$  به ترتیب یک کران پایین و بالا برای بهره‌وری انرژی بهینه هستند. به طوری که  $\gamma_{min}$  و  $\gamma_{max}$  باید به گونه‌ای انتخاب شوند که  $\phi(\gamma_{min}) > 0$  و  $\phi(\gamma_{max}) < 0$  برقرار گردد. همچنین  $\epsilon_2$  مقدار خطای قابل قبول در اندازه‌گیری ریشه تابع  $\phi(\gamma)$  می‌باشد. نکته‌ای که باید یادآوری بشود آن است که در الگوریتم عددی مثل نصف کردن معیار توقف ریشه‌یابی می‌تواند به دو صورت گرفته شود. در اینجا، با توجه به قضیه ۱، خود تابع  $\phi(\gamma)$  را معیار نزدیک شدن به ریشه در نظر گرفته‌ایم. در انتها، متغیر  $\epsilon_1$  نشان دهنده میزان خطای قابل قبول برای همگرایی به جواب بهینه سراسری توأم زمان و توان می‌باشد. برای کم کردن فضای جستجو  $\gamma^*$  در الگوریتم بالا، باید یک کران بالا و پایین برای  $\gamma^*$  بیابیم که در پیوست ۴ دو کران پایین و بالا برای  $\gamma^*$  پیشنهاد خواهیم داد.

بلوک دیاگرام الگوریتم فوق را می‌توانیم به‌صورت زیر نمایش دهیم:

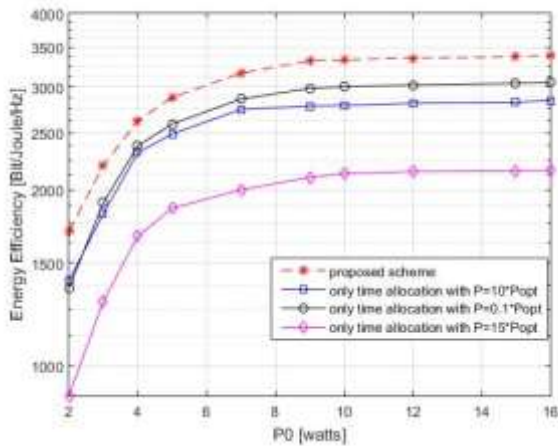


شکل ۲: بلوک دیاگرام الگوریتم تخصیص توأم توان و زمان

با تحلیل راه‌حل پیشنهادی می‌توان نشان داد که با تخصیص بهینه توان و زمان، مقدار بهره‌وری انرژی همه کاربران با هم برابر خواهد شد که اثبات ریاضی این موضوع در پیوست ۵ آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی نیز در بخش بعدی این موضوع را تأیید خواهد کرد. پیچیدگی الگوریتم مطرح شده توأم توان و زمان در هر تکرار  $\gamma$  از مرتبه  $O(\ln(\frac{1}{\epsilon_1})((1 + 3T) \log(\frac{B(\tau_i)}{\epsilon}) + K))$  می‌باشد، که در رابطه اخیر  $T$  ضریب به‌روزرسانی متغیر کنترلی مرز قیدها در الگوریتم بریر است، که معمولاً  $2 \leq T$  در نظر گرفته می‌شود. همچنین  $B(\tau_i)$  تابع بریر متناظر با مسئله تخصیص زمان می‌باشد، که با توجه به خطی



در ادامه مقایسه‌ای بین طرح معرفی شده خودمان و همچنین طرحی که در آن تنها تخصیص بهینه زمان [۹] صورت می‌گیرد انجام شده است. برای این کار شبیه‌سازی را برای یک شبکه ۴ کاربره WPCN و به ازای توان‌های  $P_0$  مختلف برای دو طرح اشاره شده انجام داده‌ایم. ابتدا نمودار برای طرح پیشنهادی با تخصیص زمان و توان بهینه رسم شده است، سپس نمودار را برای طرح با تنها تخصیص زمان بهینه رسم کرده‌ایم. این طرح را برای سه توان ارسالی مختلف در شکل ۵ نشان داده‌ایم.

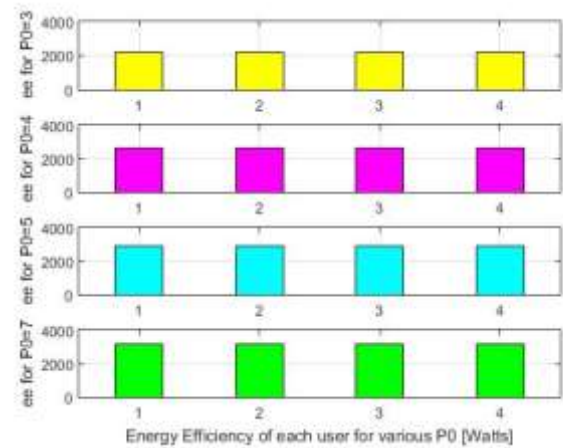


شکل ۵: مقایسه بهره‌وری انرژی (بهره‌وری بدترین کاربر) بین طرح پیشنهادی و طرح تخصیص زمان بهینه

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تخصیص توأم توان و زمان برای بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی، به‌مراتب بهره‌وری بالاتری را نسبت به طرحی که در آن تنها تخصیص زمان بهینه به کاربران انجام گرفته است، نتیجه می‌دهد. در اینجا برای طرح تخصیص تنها زمان بهینه، سه مقدار برای توان کاربران به‌صورت ضربی از توان بهینه الگوریتم پیشنهادی ما ( $P_{opt}$ ) در نظر گرفته شده است، به‌طوری‌که هم قید کیفیت سرویس و هم قید باقیمانده انرژی با این انتخاب‌ها همچنان برقرار باشند. ملاحظه می‌شود چه برای توان‌هایی که کمتر از توان بهینه و چه توان‌هایی که بیشتر از توان بهینه هستند، بهره‌وری انرژی نسبت به طرح پیشنهادی مقدار پایین‌تری را نتیجه می‌دهد.

در ادامه می‌خواهیم بررسی کنیم با افزایش یا کاهش نرخ انتقال داده‌ها یا قید کیفیت سرویس، بهره‌وری انرژی چه تغییراتی خواهد داشت. به‌طور معمول انتظار داریم وقتی حداقل گذردهی را خیلی افزایش می‌دهیم اگرچه کاربران در نرخ بالاتری ارسال داده انجام می‌دهند اما بهره‌وری انرژی کاربران کاهش پیدا می‌کند. شبیه‌سازی انجام گرفته (شکل ۶) این موضوع را به‌خوبی نشان می‌دهد. در شکل مشاهده می‌شود که تا مقدار خاصی از  $R_{min}$ ، بهره‌وری انرژی (بهره‌وری انرژی برای کاربری که کمترین مقدار را دارد) ثابت می‌ماند اما بعدازآن با افزایش  $R_{min}$  مقدار بهره‌وری انرژی نیز نزولی خواهد بود. دلیل کاهش بهره‌وری انرژی بعد از یک مقدار خاص برای  $R_{min}$ ، را می‌توان از شکل ۴ نیز به‌نوعی متوجه شد.

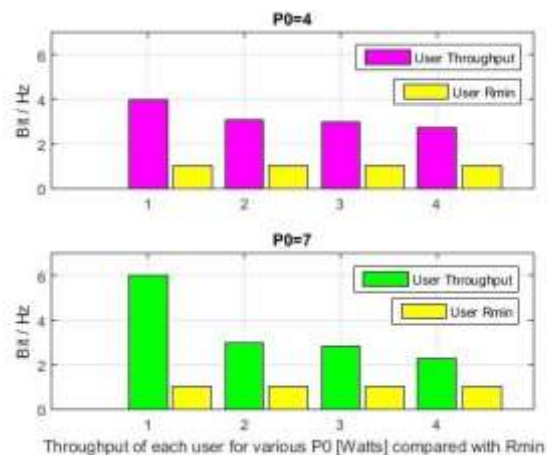
متغیر تصادفی رایس و  $\beta_i$  یک متغیر تصادفی نمایی (که توان دوم یک متغیر تصادفی راپلی است) و  $\alpha_i$  نمای تضعیف مسیر می‌باشد.  $d_{1i}$  و  $d_{2i}$  به ترتیب فاصله کاربر  $i$  تا فرستنده انرژی و گیرنده اطلاعات هستند. در شکل ۳، بهره‌وری انرژی برای ۴ کاربر که مطابق جدول ۱ توزیع شده‌اند را به ازای مقادیر مختلف  $P_0$  نمایش می‌دهد.



شکل ۳: بهره‌وری انرژی برای ۴ کاربر در WPCN در واحد Bit/Joule/Hz در  $P_0 = [3, 4, 5, 7]$  ازای

در این شکل می‌توان عدالت در بهره‌وری انرژی کاربران، همچنین افزایش بهره‌وری انرژی کاربران با افزایش توان فرستنده را مشاهده کرد.

در شکل بعدی وضعیت کاربران از لحاظ تضمین قید کیفیت سرویس را بررسی خواهیم کرد. در شکل ۴، گذردهی به‌دست‌آمده برای ۴ کاربر در کنار حداقل گذردهی مورد نیاز هر کاربر برای دو توان ارسالی متفاوت ایستگاه توان نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که قید گذردهی مورد نیاز برای تمامی کاربران برآورده شده است، و علاوه بر آن، کاربران گذردهی بالاتری را نسبت به  $R_{min}$  که 1 Bit/Hz در نظر گرفته شده بود، به دست می‌آورند. برای مثال در توان ۴ وات، کاربری که کمترین گذردهی را دارد بازهم نسبت به  $R_{min}$  به اندازه 2 Bit/Hz بیشتر است.



شکل ۴: گذردهی کاربران برای دو توان ارسالی متفاوت از ایستگاه توان  $P_0 = [4, 7]$  (وات) در مقایسه با حداقل گذردهی تضمین شده

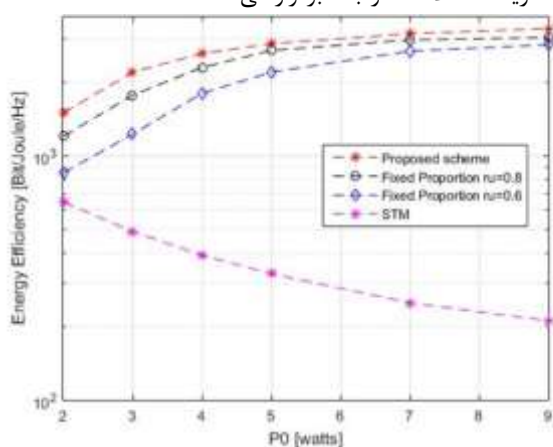


شد. نکته‌ای دیگر این است که در روش STM در نظر گرفته شده در [۵]، توان جهت ارسال داده به‌عنوان ضریبی از مدت‌زمان ارسالی داده در نظر گرفته شده است، این در حالی است که ما در اینجا توان ارسالی را به‌عنوان یک درجه آزادی جدید در نظر گرفته‌ایم، که این مدیریت توان-زمان به‌نوبه خود تأثیر بسزایی از خود به‌جای می‌گذارد.

طرح مقایسه‌ای دیگر که در شکل ۷ مطرح شده است بهره‌برداری جزئی (Partial utilization) نام دارد، در این روش تمام کاربران با یک ضریب بهره‌برداری یکسان  $\rho$  تمام انرژی دریافتی خود را جهت انتقال داده استفاده می‌کنند، که  $\rho$  می‌تواند بر اساس تعادل بین انرژی مصرفی در بلوک انتقال فعلی و انرژی ذخیره شده برای بلوک انتقال بعدی تنظیم شود [۷]. همان‌طور که از شکل نیز مشخص است، طرح پیشنهادی ما که تخصیص توأم توان و زمان برای بیشینه کردن بهره‌وری انرژی بدترین کاربر بود، نسبت به دیگر طرح‌ها، بهره‌وری انرژی بالاتری را نتیجه می‌دهد.

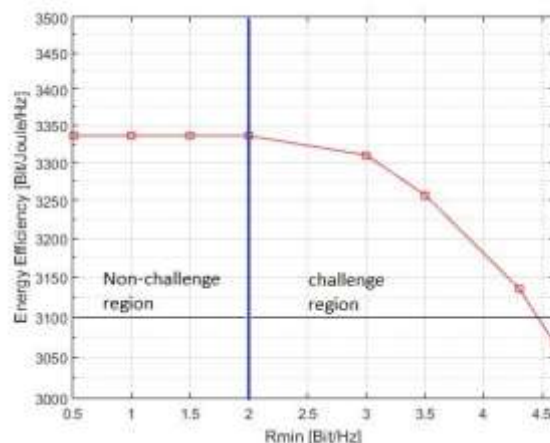
### ۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله به موضوع تخصیص توأم توان و زمان با هدف برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی بین کاربران شبکه WPCN پرداخته شده است. در این شبکه چندین کاربر با استفاده از پروتکل "برداشت سپس ارسال" ابتدا از ایستگاه توان، انرژی دریافت می‌کنند و سپس با ایستگاه دریافت اطلاعات، ارتباط برقرار می‌کنند.



شکل ۷: مقایسه بهره‌وری انرژی بدترین کاربر برای طرح پیشنهادی و دو طرح دیگر بر حسب توان فرستنده

مسئله بهینه‌سازی توأم توان و زمان با استفاده از ساده‌سازی‌های پیشنهادی و اثبات‌های ارائه شده به‌صورت ریاضی حل شده و برای دست‌یابی به جواب بهینه از ترکیب چند الگوریتم عددی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی نه تنها ما را به هدف برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی کاربران می‌رساند بلکه قیدهای حداقل نرخ مورد نیاز کاربران و محدودیت‌های شبکه WPCN را نیز تضمین می‌نماید. علاوه بر این در مقایسه با الگوریتم‌های پیشنهاد شده در مقالات با توجه به اضافه شدن درجه آزادی اختصاص توان در حل مسئله بهینه‌سازی، بهبود قابل توجهی را در تابع هدف



شکل ۶: تغییرات بهره‌وری انرژی (بدترین کاربر) نسبت به تغییر حداقل گذردهی مورد نیاز

در شکل ۴ که وضعیت کاربران از لحاظ قید کیفیت سرویس را نشان می‌داد، مشاهده می‌شود که با  $R_{min}$  در نظر گرفته شده، تمامی کاربران قید کیفیت سرویس را بدون چالش و بالاتر از مقدار مورد نیاز برآورده کردند و این به معنی غیرفعال بودن قیدهای کیفیت سرویس در مسئله هستند. اما در شکل ۶ دو ناحیه غیر چالشی و چالشی برای  $R_{min}$  وجود دارد. هنگامی که  $R_{min}$  در ناحیه اول قرار داشته باشد، قید کیفیت سرویس بدون مشکل برای تمام کاربران برآورده می‌شود و بهره‌وری انرژی تغییر نمی‌کند، اما وقتی در ناحیه دوم قرار داریم آنگاه برآورده کردن قید کیفیت سرویس نیز برای کاربران وارد چالش می‌شود و تخصیص زمان و توان به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که کاهش تدریجی بهره‌وری انرژی را به دنبال خواهد داشت. در واقع در ناحیه اول قیدهای کیفیت سرویس غیرفعال هستند و جواب بهینه بر اساس تابع هدف و بقیه قیدها تعیین می‌شود اما با افزایش گذردهی مورد نیاز هر کاربر، امکان برآورده کردن آن، بدون دخالت دادن قیدهای کیفیت سرویس در جواب بهینه امکان‌پذیر نخواهد بود و این قیدها فعال شده و جواب را تحت تأثیر قرار خواهند داد. در واقع همواره با زیاد شدن محدودیت‌ها در قید مسئله باید انتظار مقدار کمتری را برای تابع هدف که در حال بهینه‌سازی است، داشته باشیم.

در شکل ۷ کارایی طرح پیشنهادی با طرحی که در آن کاربران ضریب مشخصی از انرژی دریافت شده را استفاده می‌کنند و همچنین طرح حداکثر کردن مجموع گذردهی سیستم (STM)، مقایسه شده است. در طرحی که در آن کاربران ضریب مشخصی از انرژی دریافت شده را استفاده می‌کنند، برای ۲ ضریب مختلف شبیه‌سازی انجام شده است [۷]، و طرح STM نیز در [۵] معرفی شده است. با توجه به هدف ما در این مقاله، این مقایسه بر اساس بهره‌وری کاربری که بدترین وضعیت را دارد (یا به عبارت دیگر کمترین بهره‌وری موجود بین کاربران) انجام خواهد شد.

در طرح STM هدف بهینه‌سازی کردن مجموع گذردهی تمام کاربران است، لذا به‌صورت معناداری روش پیشنهادی ما که هدف آن برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی کاربران بود، به نتایج بهتری منتج خواهد

### پیوست ۳

با نوشتن تابع لاگرانژ برای مسئله (۱۳) داریم:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -S - \sum_{i=1}^k v_i p_i + \sum_{i=1}^k \mu_i (\tau_0 p_{cr} + \tau_i p_i + \tau_i p_c - \eta_i P_0 \tau_0 h_i) \\ & + \sum_{i=1}^k \xi_i (R_{min} - \tau_i \log(1 + \gamma_i p_i)) \\ & + \sum_{i=1}^k \lambda_i (s - \tau_i \log(1 + \gamma_i p_i) + y (\tau_0 p_{cr} + \tau_i p_i + \tau_i p_c)) \end{aligned} \quad (19)$$

با مشتق گرفتن از تابع لاگرانژ نسبت به  $S$  و  $p_i$  ها داریم:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial S} = -1 + \sum_{i=1}^k \lambda_i = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^k \lambda_i = 1 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial p_i} = -v_i + \mu_i \tau_i - \xi_i \frac{\tau_i \gamma_i}{1 + \gamma_i p_i} - \lambda_i \frac{\tau_i \gamma_i}{1 + \gamma_i p_i} + \lambda_i y \tau_i = 0 \\ \Rightarrow p_i = \frac{-\tau_i (\lambda_i + \xi_i)}{v_i - \mu_i \tau_i - \lambda_i y \tau_i} - \frac{1}{\gamma_i} \quad \forall i \end{cases} \quad (20)$$

در ادامه اگر معادلات KKT را برای این مسئله بنویسیم [۱۴] می‌توان حل توان بهینه را در سه حالت زیر خلاصه کرد:

حالت ۱: اگر  $\xi_i = 0$  باشد، در این صورت برای  $\lambda_i = 0$  یا  $\lambda_i \neq 0$  از (۲۰) خواهیم داشت:

$$p_i^* = \left[ \frac{1}{y} - \frac{1}{\gamma_i} \right]^+ \quad (21)$$

حالت ۲: اگر  $\xi_i \neq 0$  و  $\mu_i = 0$  و  $\lambda_i \neq 0$  آنگاه جواب بهینه از روی مرز قید کیفیت سرویس ( $C_3$ ) مسئله (۱۳) به دست می‌آید:

$$p_i^* = \frac{1}{\gamma_i} \left[ \exp\left(\frac{R_{min}}{\tau_i}\right) - 1 \right] \quad (22)$$

حالت ۳: اگر  $\xi_i = 0$  و  $\mu_i \neq 0$  و همچنین  $\lambda_i \neq 0$  آنگاه جواب بهینه مسئله از روی مرز قید انرژی ( $C_2$ ) مسئله (۱۳) به دست می‌آید:

$$p_i^* = \frac{(\eta_i P_0 \tau_0 h_i - \tau_0 p_{cr} - \tau_i p_c)}{\tau_i} \quad (23)$$

لازم به ذکر است دیگر حالت‌های KKT با توجه به مقادیر ضرایب لاگرانژ غیرقابل قبول می‌باشند. بنابراین می‌توان جواب‌های بهینه تخصیص توان را به صورت مجموعه  $\Gamma$  طبق لم ۲ در نظر گرفت.

### پیوست ۴

در این پیوست قصد داریم یک کران پایین و بالا برای  $y^*$  در الگوریتم JTPA بیابیم. به راحتی از تعریف، می‌توانیم مشاهده کنیم که  $\phi(y = 0) > 0$ . در واقع این خیلی پرواضح است که از آنجا که  $y$  معرف بهره‌وری انرژی است، با توجه به همواره نامنفی بودن بهره‌وری انرژی، داشته باشیم:  $y \geq 0$ . حال سعی می‌کنیم برای  $y^*$  یک کران بالا پیدا کنیم به گونه‌ای که  $y^* < y_{max}$  باشد. برای این منظور خواهیم داشت:

مسئله در نتایج شبیه‌سازی‌ها مشاهده می‌نماییم. بهینه‌سازی مصرف توان کاربران در ادامه با فرض وجود باتری می‌تواند موجب افزایش انرژی ذخیره شده در باتری و افزایش بهره‌وری در یک روند زمانی که شرایط برداشت انرژی یا کانال مخابراتی متغیر با زمان است شود.

### پیوست ۱

برای اثبات لم ۱، فرض کنیم  $\tau_a$  و  $p_a$  همچنین  $\tau_b$  و  $p_b$  یک جواب بهینه برای  $\phi(y)$  به ازای  $y_a$  و  $y_b$  باشند و همچنین  $y_a > y_b$ ، آنگاه می‌توان نشان داد:

$$\begin{cases} \phi(y_a) = \max_{\tau, p \in D} \min_i [R_i(\tau, p) - y_a E_i(\tau, p)] \\ = \min_i [R_i(\tau_a, p_a) - y_a E_i(\tau_a, p_a)] \\ < \min_i [R_i(\tau_a, p_a) - y_b E_i(\tau_a, p_a)] \\ \leq \min_i [R_i(\tau_b, p_b) - y_b E_i(\tau_b, p_b)] = \phi(y_b) \end{cases} \quad (17)$$

یا به عبارتی:

$$\begin{cases} \phi(y) > 0; & \text{if } y < y^* \\ \phi(y) = 0; & \text{if } y = y^* \\ \phi(y) < 0; & \text{if } y > y^* \end{cases} \quad (18)$$

بنابراین تابع  $\phi(y)$  نسبت به  $y$  اکیداً نزولی است.

### پیوست ۲

برای اثبات همگرایی، فرض می‌کنیم در مرحله اول قرار داریم یعنی:  $k = 1$ ، حال در ابتدا با توجه به قیدهای  $CI$  تا  $C3$ ، مسئله بهینه‌سازی  $EE_{\tau(1)} = \max_{\tau(1)} \min \phi(y)$  را به ازای اولیه محاسبه می‌کنیم. در ادامه با توجه به  $\tau^{(1)}$  بهینه به دست آمده، مسئله بهینه‌سازی  $EE_{p(1)} = \max_{p(1)} \min \phi(y)$  را محاسبه خواهیم کرد. به وضوح مشخص است که  $EE_{p(1)} \geq EE_{\tau(1)}$ . به طور مشابه، در مرحله دوم نیز چون با یک مسئله بهینه‌سازی سروکار داریم، لزوماً خواهیم داشت که:  $EE_{\tau(2)} \geq EE_{p(1)}$ . همچنین در ادامه برای  $p^{(2)}$  بهینه مرحله دوم خواهیم داشت:  $EE_{p(2)} \geq EE_{\tau(2)}$ . این روند تا به آخر می‌تواند ادامه داشته باشد، ولی با توجه به محدود بودن منابع و محدودیت‌های قیدهای مطرح شده، قطعاً جواب به مقدار خاصی در بهره‌وری همگرا خواهد شد. چراکه اگر جواب همگرا نگردد، برای مسئله  $EE = \max_{\tau, p} \min \phi(y)$  می‌توان  $k$  ای یافت به گونه‌ای که:  $EE_{p(k)} \geq EE$  که این با بهینه بودن جواب  $EE = \max_{\tau, p} \min \phi(y)$  در تناقض است. همچنین از طرفی، با توجه به لم ۲، تنها یک اکسترمم سراسری در مسئله تخصیص توان بیشتر نخواهیم داشت، بنابراین در یکی از تکرارها، قطعاً به جواب بهینه می‌رسیم و در تکرارهای بعدی دوباره جواب بهینه تکرار می‌شود. پس ثابت کردیم الگوریتم تکراری مقدار بهینه همگرا خواهد شد.

حال با توجه توضیحات بالا، می‌توانیم بر اساس متغیرهای جدید تعریف شده،  $\widehat{EE}_j$  را محاسبه نماییم. با محاسبه  $\widehat{EE}_j$  می‌توانیم نشان دهیم  $\widehat{EE}_j > EE_j^*$  سعی می‌کنیم، این گزاره آخر را اثبات کنیم: برای اثبات با توجه به (۳۱) به راحتی می‌توانیم ببینیم:

$$EE_j = \frac{\hat{\tau}_j \log(1 + \gamma_j p_j)}{\hat{\tau}_0 p_{cr} + \hat{\tau}_j p_j + \hat{\tau}_j p_c} > \frac{\beta \tau_j^* \log(1 + \gamma_j \frac{p_j}{2\beta})}{\tau_0^* p_{cr} + \tau_j^* p_j + \tau_j^* p_c} \quad (32)$$

حال با توجه به (۳۲)، کافی است ثابت کنیم:

$$\frac{\beta \tau_j^* \log(1 + \gamma_j \frac{p_j}{2\beta})}{\tau_0^* p_{cr} + \tau_j^* p_j + \tau_j^* p_c} > EE_j^* \quad (33)$$

برای اثبات (۳۳)، با توجه به (۲۸) تنها باید نشان دهیم که:

$$\beta \log\left(1 + \gamma_j \frac{p_j}{2\beta}\right) > \log(1 + \gamma_j p_j^*) \Rightarrow e^\beta > \frac{1 + \gamma_j p_j^*}{1 + \frac{\gamma_j p_j^*}{2\beta}} \quad (34)$$

دقت شود می‌توانیم برای عبارت  $\frac{1 + \gamma_j p_j^*}{1 + \frac{\gamma_j p_j^*}{2\beta}}$  به راحتی نشان دهیم:

$$2\beta \geq \frac{1 + \gamma_j p_j^*}{1 + \frac{\gamma_j p_j^*}{2\beta}}$$

است نشان دهیم که:  $e^\beta > 2\beta$ ، که نامساوی اخیر به وضوح برای تمام  $\beta \geq 1$  برقرار است. بنابراین گزاره اثبات شده است.

به صورت خلاصه ثابت کردیم می‌توانیم  $\beta > 1$  بیابیم، به طوری که مجموعه جواب  $\{\hat{p}_i\}_{i=1}^K$  و  $\{\hat{\tau}_i\}_{i=0}^K$  به دست آید، به گونه‌ای که  $EE_j = \min_k EE_k \geq EE_j = \min_k EE_k$  شود که در این صورت با بهینه بودن جواب  $\{\hat{p}_i\}_{i=1}^K$  و  $\{\hat{\tau}_i\}_{i=0}^K$  در تناقض است. پس فرض خلف باطل و حکم ثابت است.

### مراجع

- [1] I. Krikidis, S. Timotheou, S. Nikolaou, G. Zheng, D. W. K. Ng and R. Schober, "Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 11, pp. 104-110, Nov. 2014.
- [2] S. Bi, C. K. Ho, and R. Zhang, "Wireless Powered Communication: Opportunities And Challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 4, pp. 117-125, 2015.
- [3] S. Bi, Y. Zeng and R. Zhang, "Wireless powered communication networks: an overview," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 10-18, April 2016.

[۴] محمدعلی محمدی، زهرا مبینی، نرخ قابل حصول ارسال هم‌زمان اطلاعات و توان برای سیستم مخابرات دوطرفه مجهز به آرایه آنتن عظیم، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۸، شماره ۱، صفحه ۳۱۵-۳۲۶، بهار ۱۳۹۷

$$\frac{\tau_i}{\tau_i p_i + \tau_i p_c + \tau_0 p_{cr}} < \frac{1}{p_i + p_c} \quad (24)$$

$$EE_i = \frac{\tau_i \log(1 + \gamma_i p_i)}{\tau_i p_i + \tau_i p_c + \tau_0 p_{cr}} < \frac{\log(1 + \gamma_i p_i)}{p_i + p_c}, \forall i = 1, \dots, K \quad (25)$$

می‌توان ثابت کرد، که تابع  $g(p_i) = \frac{\log(1 + \gamma_i p_i)}{p_i + p_c}$  در  $p_i > 0$  دارای ماکزیمم سراسری (global) است. بنابراین به راحتی می‌توان بیان کرد برای  $p_i^* = \operatorname{argmax} g(p_i)$  خواهیم داشت که:

$$EE_i < \frac{\log(1 + \gamma_i p_i^*)}{p_i^* + p_c} \quad \forall i = 1, \dots, K \quad (26)$$

در نتیجه برای  $y^*$  خواهیم داشت که:

$$y^* < \max_i \left\{ \frac{\log(1 + \gamma_i p_i^*)}{p_i^* + p_c} \right\} \quad (27)$$

لذا کافی است کران بالای جستجوی مقدار  $y^*$  را برابر با  $y_{\max} = \max_i \left\{ \frac{\log(1 + \gamma_i p_i^*)}{p_i^* + p_c} \right\}$  قرار دهیم تا مطمئن باشیم که  $y^* \in [y_{\min}, y_{\max}]$

### پیوست ۵

فرض می‌کنیم که جواب بهینه تخصیص توان و زمان مسئله مطرح شده به صورت  $\{\tau_i^*\}_{i=0}^K$  و  $\{p_i^*\}_{i=1}^K$  باشد. بر اساس برهان خلف فرض می‌کنیم دو بهره‌وری انرژی بهینه  $EE_i^*$  و  $EE_j^*$  برای دو کاربر با همدیگر برابر نیستند،  $EE_j^* > EE_i^*$  بهره‌وری بدترین کاربر می‌باشد) یعنی:

$$\frac{\tau_i^* \log(1 + \gamma_i p_i^*)}{\tau_0^* p_{cr} + \tau_i^* p_i^* + \tau_i^* p_c} > \frac{\tau_j^* \log(1 + \gamma_j p_j^*)}{\tau_0^* p_{cr} + \tau_j^* p_j^* + \tau_j^* p_c} \quad (28)$$

با تعریف،  $\varepsilon = EE_i^* - EE_j^*$  و  $\hat{p}_i = p_i^*$  و  $\hat{\tau}_0 = \tau_0^*$ ،  $\hat{\tau}_i = \alpha \tau_i^*$ ، پر واضح هست برای کاربر  $i$  ام با وجود برآورده سازی قید کیفیت سرویس، می‌توان  $\alpha < 1$  یافت به طوری که:

$$EE_i = \frac{\tau_i \log(1 + \gamma_i p_i)}{\tau_0 p_{cr} + \tau_i p_i + \tau_i p_c} > EE_i^* - \frac{\varepsilon}{2} \quad (29)$$

حال برای کاربر  $j$  ام در نظر می‌گیریم،  $\hat{\tau}_j = \beta \tau_j^*$  و  $\hat{\tau}_0 = \tau_0^*$ ، و همچنین  $\hat{p}_j = \frac{p_j^*}{2\beta}$  که در آن  $\beta > 1$  می‌باشد. می‌توان مقدار  $\beta$  به گونه‌ای انتخاب شود که دو قید  $C_1$  و  $C_2$  همچنان برقرار باشد، پرواضح است که پارامترهای جدید، قید کیفیت سرویس را به ازای هر  $\beta > 1$  نیز راضی می‌کند. درواقع، یعنی می‌خواهیم  $\beta$  به گونه‌ای به دست آید که (۳۰) و (۳۱) را راضی نماید، یعنی:

$$\tau_i + \tau_i < \tau_j^* + \tau_i^* \quad (30)$$

$$\tau_j p_j + \tau_j p_c < \tau_j^* p_j^* + \tau_j^* p_c \quad (31)$$

- Convergence and Security (ICITCS)*, Prague, 2016, pp. 1-5.
- [10] M. Song and M. Zheng, "Energy Efficiency Optimization For Wireless Powered Sensor Networks With Nonorthogonal Multiple Access," in *IEEE Sensors Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 1-4, March 2018
- [11] S. Guo, Y. Shi, Y. Yang and B. Xiao, "Energy Efficiency Maximization in Mobile Wireless Energy Harvesting Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 7, pp. 1524-1537, July 2018.
- [12] L. Bin, Z. Yang, G. Gui, and H. Sari "Optimal time allocation in backscatter assisted wireless powered communication networks," *Sensors. journal*, vol. 17, no. 6, pp. 1258, 2017.
- [13] Y. Li, M. Sheng, X. Wang, Y. Zhang, and J. Wen, "Max-Min Energy-Efficient Power Allocation In Interference-Limited Wireless Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology.*, vol. 9, no. 64, pp. 4321-4326, 2014.
- [14] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge university press, 2009.
- [5] H. Ju and R. Zhang, "Throughput Maximization In Wireless Powered Communication Networks," *IEEE TRANS. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 418-428, Jan. 2014.
- [۶] محمد لاری، تخصیص منابع جهت کمینه‌سازی تأخیر ارسال در سامانه‌های مخابراتی تغذیه‌شونده به‌صورت بی‌سیم، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۲۰۵-۱۲۱۲، پاییز ۱۳۹۶
- [7] Q.Wu, M. Tao, D.W. K. Ng, W. Chen, and R. Schober, "Energy-Efficient Resource Allocation For Wireless Powered Communication Networks," *IEEE TRANS. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 3, pp. 2312 – 2327, Mar. 2016.
- [8] Q.Wu, W. Chen, D.W. K. Ng, J. LI, and R. Schober, "User-Centric Energy Efficiency Maximization For Wireless Powered Communications," *IEEE TRANS. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 10, pp. 6898 – 6912, Oct.2016.
- [9] B. Kim, J. Kang, H. Kim and J. Lee, "Max-Min Energy-Efficiency Optimization in Wireless Powered Communication Network with Harvest-Then-Transmit Protocol," *2016 6th International Conference on IT*

زیر نویس‌ها

- <sup>1</sup> Wireless Energy Transfer
- <sup>2</sup> Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
- <sup>3</sup> Wireless Powered Communication Network
- <sup>4</sup> Non-Orthogonal Multiple Access
- <sup>5</sup> Particle swarm optimization
- <sup>6</sup> Barrier Algorithm
- <sup>7</sup> Slot Time
- <sup>8</sup> Fractional
- <sup>9</sup> Coupling
- <sup>10</sup> Feasible
- <sup>11</sup> Bisection algorithm
- <sup>12</sup> Power Allocation (PA) Algorithm
- <sup>13</sup> Time Allocation (TA) Algorithm
- <sup>14</sup> Joint Time and Power Allocation