

# تخصیص منابع جهت کمینه‌سازی تأخیر ارسال در سامانه‌های مخابراتی تغذیه‌شونده به‌صورت بی‌سیم

محمد لاری<sup>۱</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - m\_lari@semnan.ac.ir

**چکیده:** سامانه‌های مخابراتی تغذیه‌شونده به‌صورت بی‌سیم نوع جدید از سامانه‌های مخابراتی هستند که جهت استحصال توان و همچنین برای ارسال اطلاعات خود از کانال بی‌سیم استفاده می‌کنند. این نوع از سامانه‌ها در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به ساختار این سامانه‌ها، تأخیر ارسال یک بسته داده از یک گره به ایستگاه مرکزی، شامل مدت‌زمان ارسال توان از ایستگاه مرکزی به گره و سپس مدت زمان ارسال داده‌ها از گره به ایستگاه مرکزی است. هدف این مقاله تخصیص بازه‌های زمانی فرسو و فراسو از ایستگاه مرکزی به گره و بالعکس و همچنین تخصیص توان بهینه در ایستگاه مرکزی جهت کمینه‌سازی تأخیر ارسال داده‌ها است. برای این منظور، در این مقاله دو مسئله بهینه‌سازی تعریف و حل کرده‌ایم و نتایج این دو مسئله را مقایسه کرده‌ایم. در مسئله اول بازه‌های زمانی فرسو و فراسو را مساوی فرض کرده‌ایم و در ایستگاه مرکزی از تخصیص توان بهینه استفاده می‌کنیم. در مقابل در مسئله دوم، بازه‌های زمانی را به‌صورت کلی در نظر می‌گیریم و شرط تساوی نداریم؛ اما در این حالت نیز از تخصیص توان بهینه جهت بهبود عملکرد استفاده می‌کنیم.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی، تخصیص توان، تخصیص منابع، سامانه‌های تغذیه‌شونده به‌صورت بی‌سیم.

## Resource Allocation for Transmission Delay Minimization in Wireless Powered Communication Systems

M. Lari<sup>1</sup>, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: m\_lari@semnan.ac.ir

**Abstract:** Wireless powered communication (WPC) systems are a new type of communication systems which use wireless channel for both energy harvesting and data transmission. WPC systems are recently considered in literatures. In this type of telecommunications, delay transmission includes the time duration of both power transfer and data transmission. In the downlink (DL) phase, the power transfers from the base station to the node and in the uplink (UL) phase, the data is transmitted from the node to the base station. Minimization of transmission delay using the optimal time durations and the optimal allocated power at the base station is the goal of our paper. For this purpose, we define and solve two optimization problems and compare the results. In the first problem, an equal time duration in the DL and UL phases and also the optimal power allocation at the base station are assumed. Then, in the second problem, a more general case with an unequal DL and UL time duration and optimal power allocation strategy at the base station are considered.

**Keywords:** Optimization, power allocation, resource allocation, wireless powered communication systems.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۱۳

نام نویسنده مسئول: محمد لاری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سمنان - روبروی پارک جنگلی سوکان - پردیس شماره یک - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

## ۱- مقدمه

می‌کند. حسگر پس از استحصال انرژی لازم، داده‌های خود را در مُد فراسو<sup>۱</sup> (UL) برای ایستگاه مرکزی ارسال می‌کند [۶-۹]. بدیهی است که در این حالت سرعت ارسال داده‌ها در فراسو و تضمین کیفیت سرویس آن‌ها مثل تأخیر یا نرخ خطای بیت، تابعی از مقدار توان دریافتی در شرایط فراسو است؛ بنابراین طراحی و بهینه‌سازی این سامانه‌ها، لزوماً مانند سامانه‌های مخابراتی متداول نیست.

بهینه‌سازی سامانه‌های WPC در مقالات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳-۱۶]. برای مثال در [۶، ۷]، سیستم WPC مشارکتی مبتنی بر رله‌ها مورد بررسی قرار گرفته تا با تخصیص منابع، نرخ گذردهی سیستم بیشینه شود. بیشینه‌سازی نرخ گذردهی کاربری با کمترین نرخ، در یک شبکه چندآنتنی حجیم<sup>۵</sup> WPC در [۸] بررسی شده است. همچنین دیدگاه‌های متنوعی درباره طراحی سیستم چندآنتنی حجیم WPC در این مقاله ارائه شده است. به همین ترتیب در [۹]، بیشینه‌سازی نرخ گذردهی فضایی با تخصیص هم‌زمان توان و تقسیم بازه‌های زمانی بین HAP در DL و گرهِ در UL انجام شده است. در [۱۰] نویسندگان بهینه‌سازی سیستم WPC با قید محدود بودن طول بافر فرستنده را مورد بررسی قرار داده‌اند و بازه زمانی بهینه را در کانال فراسو و فراسو تحت این قید به دست آورده‌اند. به‌طور ویژه، تخصیص بازه زمانی بهینه در کانال‌های DL و UL و تحت قیدهای متنوع محدودیت توان، محدودیت بازه زمانی و کیفیت سرویس مشخص جهت بیشینه‌سازی نرخ گذردهی سیستم WPC در [۱۱-۱۳] مورد توجه قرار گرفته است.

همان‌طور که مشخص است، تقریباً هدف همه تحقیقات قبلی بر روی سامانه‌های WPC، به نوعی بیشینه‌سازی مقدار ظرفیت و نرخ گذردهی با تخصیص توان و تخصیص منابع [۱۴] و یا تنظیم مناسب بازه‌های زمانی فراسو و فراسو است؛ اما در خیلی از مواقع، گرهِها اطلاعات زیادی برای ارسال ندارند؛ ولی همان اطلاعات کم باید با کمترین تأخیر برای ایستگاه مرکزی ارسال شود (مثل دسته‌ای از حسگرهای کاشته‌شده در بدن موجودات زنده). در این شرایط، بهینه‌سازی سیستم WPC برای کمینه‌سازی مجموع زمان انتقال توان از HAP به گرهِ و سپس ارسال داده از گرهِ به HAP مطلوب‌تر است. این موضوع یعنی کمینه‌سازی تأخیر ارسال اطلاعات که در مقالات دیگر تاکنون مورد توجه نبوده است، موضوع اصلی این مقاله است. برای رسیدن به این هدف، ما دو مسئله متفاوت با فرضیات متفاوت تعریف کرده‌ایم و در هر مسئله تلاش کرده‌ایم که با تنظیم مناسب بازه‌های زمانی فراسو و فراسو و همچنین تخصیص توان مناسب، تأخیر ارسال اطلاعات را کمینه کنیم. تعریف دقیق مسئله‌ها در ادامه آورده شده است.

- در مسئله  $P_1$  فرض می‌کنیم طول بازه‌های زمانی DL و UL برابر هستند و در HAP تخصیص توان داریم. بازه‌های زمانی برابر، فرض اولیه در ارتباطات چندکاربره قدیمی مانند GSM<sup>۶</sup> می‌باشد [۱۵].
- در مسئله  $P_2$  طول بازه‌های زمانی DL و UL برابر نیستند و در HAP از تخصیص توان بهینه استفاده می‌کنیم. این مسئله در مقایسه با مسئله قبل کلی‌تر است و در همه ارتباطات نقطه‌به‌نقطه

با افزایش چشمگیر سامانه‌های الکترونیکی و مخابراتی و کاربردهای متنوع آن‌ها در سالیان اخیر، بحث تأمین توان مصرفی آن‌ها نیز به یک موضوع چالشی تبدیل شده است. به‌عنوان مثال در یک شبکه جمع‌آوری‌کننده اطلاعات با گرهِهای متعدد و پراکنده، تأمین توان گرهِها از طریق شبکه برق سراسری معمولاً ممکن نیست و گرهِها ناچار هستند که از باتری استفاده کنند؛ بنابراین، شارژ مجدد یا تعویض باتری گرهِها در بازه‌های زمانی مشخص، لازم و ضروری است. این شارژ مجدد یا تعویض باتری همیشه به‌سادگی قابل انجام نیست. برای مثال انجام این کار برای سامانه‌های نصب‌شده در مناطق صعب‌العبور، ادوات متحرک و یا بعضی از تجهیزات نظامی بسیار هزینه‌بر و دشوار و در مواردی مانند حسگرهای کاشته‌شده در بدن موجودات زنده، تقریباً غیرممکن است. به همین دلیل در این موارد اغلب مکانیسم‌ها و مداراتی جهت شارژ مجدد باتری و با استفاده از انرژی‌های موجود در طبیعت تعیبه می‌شود [۱].

موضوع استحصال انرژی از طبیعت بسیار گسترده بوده و تحقیقات زیادی روی آن انجام شده و می‌شود [۲] و مراجع داخل آن را ببینید). در روش سنتی جهت استحصال انرژی، اغلب از انرژی خورشید و یا انرژی‌های دیگری مانند باد یا تشعشعات RF محیطی استفاده می‌شود. استفاده از این انرژی‌ها - علی‌رغم مزایای زیادی که دارند - همیشه ممکن نیست. مثلاً امکان استفاده از انرژی خورشید در شب وجود ندارد و یا سرعت وزش باد همیشه یکسان نیست؛ بنابراین، در روش جدیدتر استحصال، انرژی در جای دیگری تولیدشده و به‌صورت مدیریت‌شده برای مصرف‌کننده ارسال می‌شود. این انرژی معمولاً به‌صورت الکترومغناطیسی تولید و به‌صورت بی‌سیم برای مصرف‌کننده ارسال می‌شود. موضوع انتقال توان بی‌سیم در منابع مختلفی مانند [۱، ۲] مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شرایط کانال بی‌سیم، تلف توان در انتقال توان بی‌سیم و مخصوصاً در فاصله‌های زیاد، قابل‌ملاحظه است و راندمان این روش پایین است. باین‌وجود، به‌دلیل امکان مدیریت کامل این انتقال و نداشتن محدودیت‌های دیگر انرژی‌های محیطی، این تکنیک در سالیان اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است و حتی محصولات زیادی نیز بر پایه این تکنیک ساخته شده است [۳]. همچنین تحقیقات زیادی جهت افزایش راندمان این تکنیک در حال انجام است که به فراگیر شدن این روش کمک زیادی می‌کند [۴].

اغلب حسگرها و ادوات الکترونیکی، پس از جمع‌آوری اطلاعات باید آن را برای یک مرکز تصمیم‌گیری و کنترل ارسال کنند؛ بنابراین حسگر پس از دریافت توان به‌صورت بی‌سیم، داده‌هایش را نیز به‌صورت بی‌سیم برای مرکز ارسال می‌کند. این نوع از سامانه‌های مخابراتی<sup>۱</sup> (WPC) که در آن‌ها دریافت توان توسط گرهِ و ارسال اطلاعات از گرهِ به مرکز هر دو به‌صورت بی‌سیم انجام می‌شود، موضوع بررسی این مقاله است. تکنیک‌های مختلف و متنوعی برای پیاده‌سازی این نوع سامانه‌های مخابراتی وجود دارد [۵]. در یک حالت ساده، ابتدا یک ایستگاه مرکزی چندکاره<sup>۲</sup> (HAP) در مُد فراسو<sup>۲</sup> (DL) توان لازم را برای حسگر ارسال

برای HAP ارسال می‌کند. با توجه به رابطه (۲)، گره در بازه زمانی  $T_2$  قادر به ارسال  $R_n$  بیت مطابق رابطه (۳) است

$$R_n = BT_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_n d^{-\nu}}{\sigma_0^2} \right) \quad (3)$$

که در آن  $B$  پهنای باند در دسترس سیستم و  $\sigma_0^2$  توان نویز در گیرنده HAP را نشان می‌دهد. مشخص است که تعداد بیت‌های ارسالی در رابطه (۳) برابر مقدار ظرفیت کانال در نظر گرفته شده است که می‌توانیم با تکنیک‌ها و کدینگ‌های خاص به این مقدار برسیم. هم‌چنین بدیهی است که  $R_n$  باید بیشتر یا مساوی  $R_0$  باشد. حالا با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲)، رابطه (۳) را به صورت

$$\begin{aligned} R_n &= BT_2 \log_2 \left( 1 + \frac{E_n d^{-\nu}}{\sigma_0^2 T_2} \right) \\ &= BT_2 \log_2 \left( 1 + \frac{\alpha \eta P_0 d^{-2\nu} T_1}{\sigma_0^2 T_2} \right) \\ &= BT_2 \log_2 \left( 1 + \alpha \gamma_0 \frac{T_1}{T_2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

بازنویسی می‌کنیم که در آن  $\gamma_0 = \eta P_0 d^{-2\nu} / \sigma_0^2$  نسبت توان سیگنال به توان نویز  $^A$  (SNR) دریافتی در گیرنده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که قبلاً هم گفتیم، طول بسته‌های جمع‌آوری شده توسط گره ماهیت آماری با توزیع تصادفی  $f_{R_0}(x)$  دارد. برای مدل‌سازی ترافیک، توزیع‌های تصادفی مختلفی وجود دارد [۱۶]؛ اما متداول‌ترین و ساده‌ترین مدل، توزیع پواسن با تابع چگالی احتمال مطابق (۵) است [۱۶].

$$f_{R_0}(x) = \frac{\rho_0^x e^{-\rho_0}}{x!}, \quad x \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad (5)$$

در این رابطه  $\rho_0$  پارامتر توزیع تصادفی پواسن و برابر میانگین این توزیع است.

### ۳- کمینه‌سازی تأخیر ارسال

در این بخش دو مسئله بهینه‌سازی با شرایط متفاوت جهت کمینه‌سازی تأخیر ارسال در یک سیستم WPC طرح و حل می‌شود. با توجه به توضیحات بخش ۲، تأخیر ارسال در سیستم WPC شامل مدت‌زمان ارسال توان از HAP به گره یعنی  $T_1$  و هم‌چنین مدت‌زمان ارسال اطلاعات از گره به HAP یعنی  $T_2$  است؛ بنابراین، هدف این مقاله کمینه‌سازی  $T_1 + T_2$  تحت قیدهای متفاوت است.

#### ۳-۱- مسئله $\mathcal{P}_1$

در این مسئله بازه‌های زمانی فرسو و فراسو را مساوی فرض می‌کنیم یعنی  $T_1 = T_2 = T_0$  است. هم‌چنین جهت بهبود عملکرد، در HAP تخصیص توان داریم. پس  $\mathbb{E}\{\alpha\} \leq 1$  است؛ بنابراین، مسئله بهینه‌سازی  $\mathcal{P}_1$  به صورت زیر نوشته می‌شود و هدف آن محاسبه بازه زمانی بهینه  $T_0^*$  و ضریب تخصیص توان بهینه  $\alpha^*$  است.

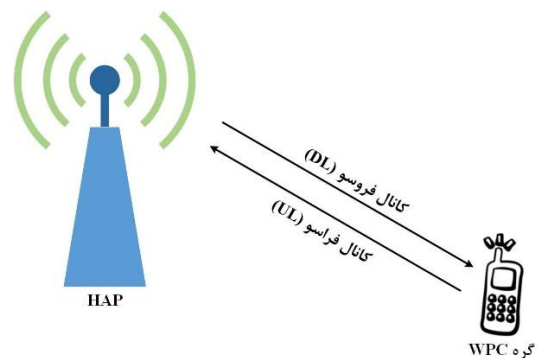
$$\{T_0^*, \alpha^*\} = \arg \min_{T_0, \alpha} 2T_0 \quad (6)$$

و با ارتباطات چندکاربره جدید مانند LTE<sup>v</sup> قابل استفاده می‌باشد [۱۵].

این مقاله در ادامه شامل بخش‌های زیر است. در بخش ۲ مدل سیستم را توضیح داده‌ایم و در بخش ۳ دو مسئله بهینه‌سازی طرح و حل شده‌اند. نتایج عددی و مقایسه آن‌ها در بخش ۴ آورده شده است و در نهایت در بخش ۵ نتیجه‌گیری مقاله را خواهیم داشت.

### ۲- مدل سیستم

سیستم موردنظر در این مقاله، یک سیستم مخابراتی نقطه‌به‌نقطه با یک HAP و یک گره WPC مطابق شکل ۱ است. با توجه به این نکته که سامانه‌های WPC اغلب در فواصل کوتاه کاربرد دارند، کانال بین HAP و گره را کانال دید مستقیم و بدون محوشوندگی در نظر می‌گیریم.



شکل ۱: مدل سیستم

در این مدل، گره WPC یک حسگر با توان محدود است که مشغول جمع‌آوری اطلاعات پیرامون خود است اما توان کافی برای انتقال اطلاعات به HAP را در اختیار ندارد. در مقابل HAP دارای تقویت‌کننده توان با قدرت متوسط ارسالی  $P_0$  است؛ بنابراین وقتی گره بسته‌های شامل  $R_0$  بیت جهت ارسال جمع‌آوری می‌کند، ابتدا HAP توان لازم را در کانال فرسو و در بازه زمانی  $T_1$  برای گره ارسال می‌کند. توان ارسالی HAP به صورت  $\alpha P_0$  است و  $\alpha$  ضریب تخصیص توان را نشان می‌دهد. جهت ثابت بودن متوسط توان ارسالی از HAP، میانگین آماری  $\alpha$  یعنی  $\mathbb{E}\{\alpha\} \leq 1$  فرض می‌شود. با توجه به عملکرد حسگرها و نحوه جمع‌آوری اطلاعات،  $R_0$  ماهیت آماری با توزیع تصادفی مشخص و تابع چگالی احتمال  $f_{R_0}(x)$  دارد. پس از پایان بازه زمانی ارسال توسط HAP، گره انرژی لازم جهت ارسال داده‌هایش را استحصال کرده است. این مقدار انرژی استحصال شده برابر

$$E_n = \eta \alpha P_0 d^{-\nu} T_1 \quad (1)$$

است که در آن  $0 \leq \eta \leq 1$  بازدهی تبدیل انرژی الکترومغناطیس به انرژی الکتریکی در گره،  $d$  فاصله بین HAP و گره و  $\nu$  نمای افت مسیر است. پس از استحصال انرژی، گره در کانال فراسو و در بازه زمانی  $T_2$  داده‌هایش را با توان

$$P_n = \frac{E_n}{T_2} \quad (2)$$

$$T_0^* = \frac{R_0 \ln 2}{B \ln(1 + \alpha^* \gamma_0)} \quad (18)$$

$$= \frac{R_0 \ln 2}{2B \mathcal{W}_0 \left( \sqrt{\frac{2 \ln 2 \gamma_0 R_0}{B \mu^*}} / 2 \right)}$$

به‌همین ترتیب، مقدار متوسط تأخیر ارسال به‌صورت

$$\overline{\text{TD}} = \mathbb{E}\{2T_0^*\} = \sum_{x=0}^{\infty} 2T_0^* f_{R_0}(x) \quad (19)$$

$$= \sum_{x=0}^{\infty} \frac{x \ln 2}{2B \mathcal{W}_0 \left( \sqrt{\frac{2 \ln 2 \gamma_0 x}{B \mu^*}} / 2 \right)} \frac{\rho_0^x e^{-\rho_0}}{x!}$$

محاسبه می‌شود. با توجه به مقعر بودن رابطه (۱۸) و با استفاده از نامساوی Jensen [۱۶]، حد بالایی برای متوسط تأخیر ارسال به‌صورت (۲۰) نیز قابل‌نوشتن است.

$$\overline{\text{TD}} \leq \frac{\rho_0 \ln 2}{B \mathcal{W}_0 \left( \sqrt{\frac{2 \ln 2 \gamma_0 \rho_0}{B \mu^*}} / 2 \right)} \quad (20)$$

در بخش شبیه‌سازی نشان داده‌ایم که این حد با تقریب نسبتاً خوبی با متوسط تأخیر ارسال برابر می‌شود.

### ۳-۲- مسئله $\mathcal{P}_2$

این مسئله حالت کلی‌تر مسئله قبلی است به‌طوری‌که بازه‌های زمانی فروسو و فراسو لزوماً مساوی نیستند و در HAP نیز تخصیص توان داریم و  $\mathbb{E}\{\alpha\} \leq 1$  است؛ بنابراین، مسئله بهینه‌سازی  $\mathcal{P}_2$  به‌صورت زیر نوشته می‌شود و هدف آن محاسبه بازه‌های زمانی بهینه  $T_1^*$  و  $T_2^*$  و ضریب تخصیص توان بهینه  $\alpha^*$  است:

$$\{T_1^*, T_2^*, \alpha^*\} = \arg \min_{T_1, T_2, \alpha} T_1 + T_2 \quad (21)$$

$$\text{s.t. } R_n = B T_2 \log_2 \left( 1 + \alpha \gamma_0 \frac{T_1}{T_2} \right) \geq R_0 \quad (22)$$

$$\mathbb{E}\{\alpha\} \leq 1 \quad (23)$$

در این رابطه‌ها، (۲۱) تابع هزینه و (۲۲) و (۲۳) قیدهای مسئله هستند. برای حل این مسئله بهینه‌سازی مجدداً از روش ضرایب لاگرانژ استفاده می‌کنیم و تابع هزینه را به‌صورت

$$J = -(T_1 + T_2) + \lambda \left( -R_0 + B T_2 \log_2 \left( 1 + \alpha \gamma_0 \frac{T_1}{T_2} \right) \right) + \mu (1 - \mathbb{E}\{\alpha\}) \quad (24)$$

می‌نویسیم. در اینجا  $\lambda \geq 0$  و  $\mu \geq 0$  ضرایب لاگرانژ متناسب با قیدهای (۲۲) و (۲۳) می‌باشند. با مشتق‌گیری از رابطه (۲۴) نسبت به  $T_1$  و  $T_2$  و  $\alpha$  به رابطه‌های زیر می‌رسیم:

$$\frac{\partial J}{\partial T_1} = -1 + \lambda \frac{B}{\ln 2} \frac{\alpha \gamma_0}{1 + \alpha \gamma_0 \frac{T_1}{T_2}} \quad (25)$$

$$\text{s.t. } R_n = B T_0 \log_2(1 + \alpha \gamma_0) \geq R_0 \quad (7)$$

$$\mathbb{E}\{\alpha\} \leq 1 \quad (8)$$

در این رابطه (۶) تابع هزینه و (۷) و (۸) قیدهای مسئله هستند. برای حل این مسئله بهینه‌سازی از روش ضرایب لاگرانژ استفاده می‌کنیم و تابع هزینه را به‌صورت

$$J = -2T_0 + \lambda(-R_0 + B T_0 \log_2(1 + \alpha \gamma_0)) + \mu(1 - \mathbb{E}\{\alpha\}) \quad (9)$$

می‌نویسیم. در این رابطه  $\lambda \geq 0$  و  $\mu \geq 0$  ضرایب لاگرانژ متناسب با قیدهای (۷) و (۸) می‌باشند. با مشتق‌گیری از رابطه (۹) نسبت به  $T_0$  و  $\alpha$  به دو رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{\partial J}{\partial T_0} = -2 + \lambda B \log_2(1 + \alpha \gamma_0) \quad (10)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = \frac{\lambda B}{\ln 2} \frac{T_0 \gamma_0}{1 + \alpha \gamma_0} - \mu \quad (11)$$

حالا باید  $T_0^*$ ،  $\alpha^*$ ،  $\lambda^*$  و  $\mu^*$  را طوری محاسبه کنیم که چهار معادله زیر برقرار باشند:

$$-2 + \lambda^* B \log_2(1 + \alpha^* \gamma_0) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\lambda^* B}{\ln 2} \frac{T_0^* \gamma_0}{1 + \alpha^* \gamma_0} - \mu^* = 0 \quad (13)$$

$$\lambda^* (-R_0 + B T_0^* \log_2(1 + \alpha^* \gamma_0)) = 0 \quad (14)$$

$$\mu^* (1 - \mathbb{E}\{\alpha^*\}) = 0 \quad (15)$$

با توجه به مثبت بودن همه پارامترها، از معادله (۱۲) نتیجه می‌گیریم که  $\lambda^* \neq 0$  و از معادله (۱۳) نتیجه می‌گیریم که  $\mu^* \neq 0$  است. سپس از معادله (۱۲)  $\lambda^*$  را برحسب  $\alpha^*$  می‌نویسیم و از معادله (۱۳)  $T_0^*$  را برحسب  $\alpha^*$  می‌نویسیم و در معادله (۱۴) قرار می‌دهیم تا معادله (۱۶) به‌صورت زیر حاصل شود.

$$(1 + \alpha^* \gamma_0) \ln^2(1 + \alpha^* \gamma_0) = \frac{2 \ln 2 \gamma_0 R_0}{B \mu^*} \quad (16)$$

با حل معادله (۱۶)،  $\alpha^*$  به‌صورت

$$\alpha^* = \frac{e^{2 \mathcal{W}_0 \left( \sqrt{\frac{2 \ln 2 \gamma_0 R_0}{B \mu^*}} / 2 \right)} - 1}{\gamma_0} \quad (17)$$

محاسبه می‌شود. در این رابطه  $\mathcal{W}_0(\cdot)$  تابع Lambert W را نشان می‌دهد [۱۷] (توضیحات مختصری درباره این تابع و همچنین استخراج رابطه (۱۷) از معادله (۱۶) در بخش پیوست‌ها آورده شده است). پارامتر  $\mu^*$  نیز از رابطه  $\mathbb{E}\{\alpha^*\} = 1$  قابل‌محاسبه است. به‌همین ترتیب و با استفاده از (۱۴)،  $T_0^*$  نیز برابر (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$BT_2^* \log_2(1 + \alpha^* \gamma_0 T^*) = R_0 \quad (40)$$

$$\mathbb{E}\{\alpha^*\} = 1 \quad (41)$$

سپس از معادله (۴۰)  $T_2^*$  را برحسب  $\alpha^*$  و  $T^*$  می‌نویسیم و تعداد معادله‌ها را باز هم یکی کمتر می‌کنیم و به صورت (۴۲) تا (۴۴) می‌نویسیم.

$$\frac{1 + \alpha^* \gamma_0 T^*}{\alpha^* \gamma_0} \ln(1 + \alpha^* \gamma_0 T^*) = 1 + T^* \quad (42)$$

$$\frac{R_0 \ln 2}{B} T^* = \alpha^* \mu^* \ln(1 + \alpha^* \gamma_0 T^*) \quad (43)$$

$$\mathbb{E}\{\alpha^*\} = 1 \quad (44)$$

حالا با توجه به تعریف تابع Lambert W [۱۷]، معادله (۴۲) را به صورت (۴۵) بازنویسی می‌کنیم.

$$1 + \alpha^* \gamma_0 T^* = e^{1 + \gamma_0 \left( \frac{\alpha^* \gamma_0 - 1}{e} \right)} \quad (45)$$

اگر از معادله (۴۵) استفاده کنیم و به جای  $T^*$  در معادله (۴۳) قرار دهیم، یک رابطه برای محاسبه  $\alpha^*$  به صورت

$$\frac{B \mu^* \gamma_0}{R_0 \ln 2} \alpha^{*2} \left( 1 + \gamma_0 \left( \frac{\alpha^* \gamma_0 - 1}{e} \right) \right) = e^{1 + \gamma_0 \left( \frac{\alpha^* \gamma_0 - 1}{e} \right)} - 1 \quad (46)$$

به دست می‌آوریم. محاسبه  $\alpha^*$  به صورت فرم بسته از معادله (۴۶) امکان‌پذیر نیست و باید به صورت عددی از رابطه (۴۶) محاسبه شود. هم‌چنین  $\mu^*$  نیز ثابت مسئله است که با استفاده از معادله (۴۴) محاسبه می‌شود. پس از آن و با استفاده از (۳۹) و (۴۵)،  $T_1^*$  و  $T_2^*$  را مطابق رابطه‌های زیر محاسبه می‌کنیم:

$$T_1^* = \alpha^* \mu^* \quad (47)$$

$$T_2^* = \frac{\alpha^{*2} \mu^* \gamma_0}{e^{1 + \gamma_0 \left( \frac{\alpha^* \gamma_0 - 1}{e} \right)} - 1} \quad (48)$$

دقت کنید که  $T_1^*$  و  $T_2^*$  در دو رابطه بالا به‌طور صریح به  $R_0$  وابسته نیستند و وابستگی آن‌ها به  $R_0$  به دلیل وابستگی  $\alpha^*$  به  $R_0$  است؛ بنابراین  $T_1^*$  و  $T_2^*$  نیز ماهیت تصادفی دارند. درنهایت نیز متوسط تأخیر ارسال به صورت عددی و مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\overline{\text{TD}} = \mathbb{E}\{T_1^* + T_2^*\} = \sum_{x=0}^{\infty} (T_1^* + T_2^*) f_{R_0}(x) \quad (49)$$

هم‌چنین با استفاده از نامساوی Jensen [۱۶] و رابطه  $\mathbb{E}\{\alpha^*\} = 1$ ، حد بالایی برای متوسط تأخیر ارسال به صورت (۵۰) نوشته می‌شود.

$$\overline{\text{TD}} \leq \mu^* \left( 1 + \frac{\gamma_0}{e^{1 + \gamma_0 \left( \frac{\gamma_0 - 1}{e} \right)} - 1} \right) \quad (50)$$

$$\frac{\partial J}{\partial T_2} = 1 + \lambda \left( B \log_2 \left( 1 + \alpha \gamma_0 \frac{T_1}{T_2} \right) - \frac{B}{\ln 2} \frac{\alpha \gamma_0 \frac{T_1}{T_2}}{1 + \alpha \gamma_0 \frac{T_1}{T_2}} \right) \quad (26)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = \frac{\lambda B}{\ln 2} T_2 \frac{\gamma_0 \frac{T_1}{T_2}}{1 + \alpha \gamma_0 \frac{T_1}{T_2}} - \mu \quad (27)$$

حالا باید  $T_1^*$ ،  $T_2^*$ ،  $\alpha^*$ ،  $\lambda^*$  و  $\mu^*$  را طوری محاسبه کنیم که پنج معادله زیر برقرار باشند:

$$-1 + \lambda^* \frac{B}{\ln 2} \frac{\alpha^* \gamma_0}{1 + \alpha^* \gamma_0 \frac{T_1^*}{T_2^*}} = 0 \quad (28)$$

$$-1 + \lambda^* \left( B \log_2 \left( 1 + \alpha^* \gamma_0 \frac{T_1^*}{T_2^*} \right) - \frac{B}{\ln 2} \frac{\alpha^* \gamma_0 \frac{T_1^*}{T_2^*}}{1 + \alpha^* \gamma_0 \frac{T_1^*}{T_2^*}} \right) = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\lambda^* B}{\ln 2} T_2^* \frac{\gamma_0 \frac{T_1^*}{T_2^*}}{1 + \alpha^* \gamma_0 \frac{T_1^*}{T_2^*}} - \mu^* = 0 \quad (30)$$

$$\lambda^* \left( -R_0 + BT_2^* \log_2 \left( 1 + \alpha^* \gamma_0 \frac{T_1^*}{T_2^*} \right) \right) = 0 \quad (31)$$

$$\mu^* (1 - \mathbb{E}\{\alpha^*\}) = 0 \quad (32)$$

با توجه به مثبت بودن همه پارامترها، از معادله (۲۸) نتیجه می‌گیریم که  $\lambda^* \neq 0$  و از معادله (۳۰) نیز نتیجه می‌گیریم که  $\mu^* \neq 0$  است. جهت ساده‌سازی بیشتر و حل معادلات (۲۸) تا (۳۲)، از متغیر کمکی  $T^* = T_1^* / T_2^*$  استفاده می‌کنیم و معادله‌ها را به صورت

$$\lambda^* \frac{B}{\ln 2} \frac{\alpha^* \gamma_0}{1 + \alpha^* \gamma_0 T^*} = 1 \quad (33)$$

$$\lambda^* B \log_2(1 + \alpha^* \gamma_0 T^*) = 1 + \lambda^* \frac{B}{\ln 2} \frac{\alpha^* \gamma_0 T^*}{1 + \alpha^* \gamma_0 T^*} \quad (34)$$

$$\frac{\lambda^* B}{\ln 2} T_2^* \frac{\gamma_0 T^*}{1 + \alpha^* \gamma_0 T^*} = \mu^* \quad (35)$$

$$BT_2^* \log_2(1 + \alpha^* \gamma_0 T^*) = R_0 \quad (36)$$

$$\mathbb{E}\{\alpha^*\} = 1 \quad (37)$$

بازنویسی می‌کنیم. ابتدا از معادله (۳۳)،  $\lambda^*$  را برحسب  $\alpha^*$  و  $T^*$  می‌نویسیم و تعداد معادله‌ها را یکی کمتر کرده و به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم.

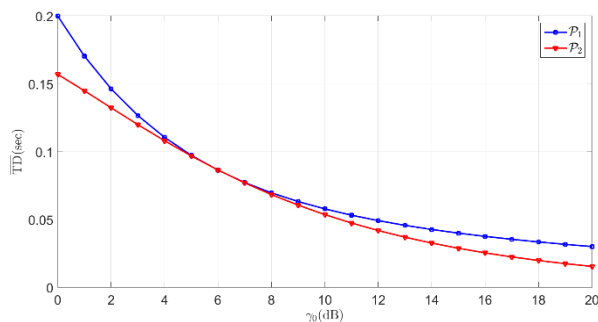
$$\frac{1 + \alpha^* \gamma_0 T^*}{\alpha^* \gamma_0} \ln(1 + \alpha^* \gamma_0 T^*) = 1 + T^* \quad (38)$$

$$T_2^* T^* = \alpha^* \mu^* \quad (39)$$

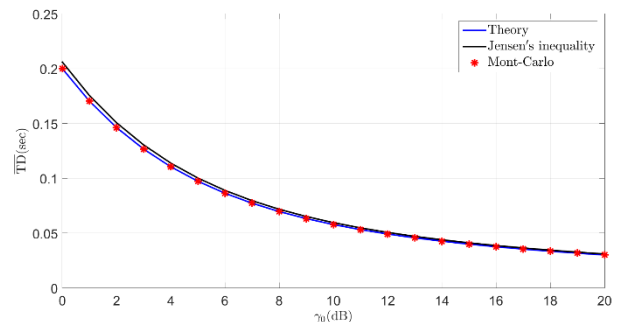
#### ۴- نتایج عددی

در این بخش نتایج دو مسئله بهینه‌سازی طرح‌شده در بخش ۳ را به صورت عددی مقایسه می‌کنیم. در این بخش  $B=10\text{KHz}$  و  $\rho_0=1000$  بیت فرض شده است. پارامترهای دیگر در صورت لزوم در جای خود مقداردهی شده‌اند.

در شکل ۴ هم متوسط تأخیر ارسال در دو مسئله  $P_1$  و  $P_2$  باهم مقایسه شده‌اند. مشخص است که تأخیر ارسال در مسئله دوم و مخصوصاً در SNR های بالا و پایین، کمتر از تأخیر ارسال در مسئله اول است؛ بنابراین، یکسان فرض نکردن بازه زمانی فرسو و فراسو به همراه تخصیص توان، در SNR های بالا و پایین به شدت توصیه می‌شود. در عوض در SNR های میانی، نتایج دو مسئله تقریباً یکسان هستند و با توجه به ساده‌تر بودن روابط مسئله اول، استفاده از آن در این شرایط مناسب‌تر به نظر می‌رسد.



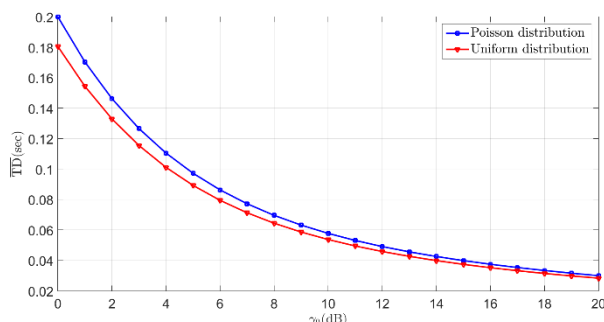
شکل ۴: مقایسه نتایج مسئله اول و دوم



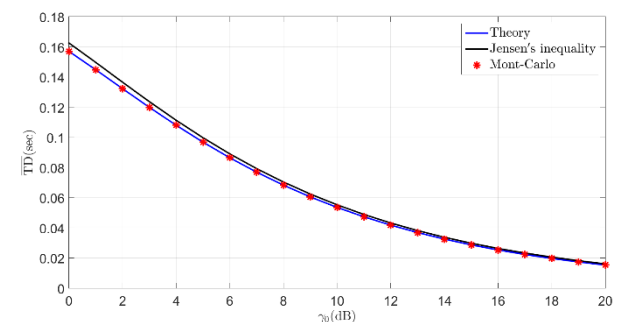
شکل ۲: متوسط تأخیر ارسال در مسئله اول

در شکل ۲ متوسط تأخیر ارسال در مسئله  $P_1$  برحسب SNR رسم شده است. در این شکل مقدار تئوری یعنی رابطه (۱۹)، شبیه‌سازی مونت‌کارلو و حد بالای متوسط تأخیر یعنی رابطه (۲۰) به طور هم‌زمان رسم شده‌اند. یکسان بودن نتایج شبیه‌سازی و تئوری، درست بودن روابط استخراج‌شده را تأیید می‌نماید. همچنین حد بالای استخراج‌شده با استفاده از نامساوی Jensen نیز با تقریب خوبی مساوی رابطه تئوری استخراج‌شده است و می‌توان برای سادگی محاسبه متوسط تأخیر ارسال از آن استفاده کرد. بدیهی است که با افزایش SNR، متوسط تأخیر ارسال کاهش می‌یابد.

برای مقایسه آخر، توزیع تصادفی ترافیک را تغییر داده و به جای توزیع پواسن در رابطه (۵)، از توزیع یکنواخت هم استفاده کرده و نتایج را برای مسئله اول در شکل ۵ رسم کرده‌ایم. متوسط تأخیر ارسال مخصوصاً در SNR های بالا تفاوت زیادی ندارند. هرچند که در SNR های پایین تفاوت قابل‌ملاحظه می‌شود. علت این تفاوت نیز در تفاوت توزیع متغیر تصادفی پواسن و یکنواخت می‌باشد. علی‌رغم تساوی میانگین برای هر دو توزیع، چون واریانس برای متغیر تصادفی یکنواخت بیشتر از واریانس برای متغیر تصادفی پواسن است، بنابراین تغییرات آن حول میانگین بیشتر بوده و تأثیر تخصیص توان و بازه‌های زمانی بهینه روی آن بیشتر است. پس عملکرد سیستم با ترافیک ورودی یکنواخت در SNR های پایین بهتر می‌شود.



شکل ۵: مقایسه نتایج برای دو توزیع پواسن و یکنواخت



شکل ۳: متوسط تأخیر ارسال در مسئله دوم

در شکل ۳ نیز متوسط تأخیر ارسال در مسئله  $P_2$  برحسب SNR رسم شده است. در این شکل مقدار تئوری یعنی رابطه (۴۹)، شبیه‌سازی مونت‌کارلو و حد بالای متوسط تأخیر یعنی رابطه (۵۰) به طور هم‌زمان رسم شده‌اند. یکسان بودن نتایج شبیه‌سازی و تئوری، همانند شکل قبلی، درست بودن روابط استخراج‌شده را تأیید می‌نماید. همچنین حد بالای استخراج‌شده با استفاده از نامساوی Jensen نیز با تقریب خوبی مساوی رابطه تئوری استخراج‌شده است و می‌توان برای سادگی محاسبه متوسط تأخیر ارسال از آن استفاده کرد. بدیهی است که با افزایش SNR، متوسط تأخیر ارسال کاهش می‌یابد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله کمینه‌سازی تأخیر ارسال در سامانه‌های مخابراتی که به صورت بی‌سیم تغذیه می‌شوند (WPC) را مورد توجه قرار دادیم. برای این منظور دو مسئله بهینه‌سازی تعریف کردیم. در مسئله اول، بازه زمانی

*Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1384–1412, Secondquarter 2016.

[۳] شهریاری‌نسب، پرستگاری، معلم، «استفاده از الگوریتم زنبورهای عسل برای بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال توان بدون تماس به روش القایی برای شارژ خودروهای الکتریکی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۳ شماره ۲، صفحه ۱۹–۹، زمستان ۱۳۹۲.

- [4] K. Huang, C. Zhong, and G. Zhu, "Some new research trends in wirelessly powered communications," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 19–27, April 2016.
- [5] S. Bi, Y. Zeng, and R. Zhang, "Wireless powered communication networks: an overview," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 10–18, April 2016.
- [6] H. Chen, Y. Li, J. L. Rebelatto, B. F. Uchôa-Filho, and B. Vucetic, "Harvest-then-cooperate: wireless-powered cooperative communications," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 63, no. 7, pp. 1700–1711, April 2015.
- [7] Y. Ma, H. Chen, Z. Lin, Y. Li, and B. Vucetic, "Distributed and optimal resource allocation for power beacon-assisted wireless-powered communications," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 10, pp. 3569–3583, Oct 2015.
- [8] G. Yang, C. K. Ho, R. Zhang, and Y. L. Guan, "Throughput optimization for massive mimo systems powered by wireless energy transfer," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 8, pp. 1640–1650, Aug 2015.
- [9] Y. L. Che, L. Duan, and R. Zhang, "Spatial throughput maximization of wireless powered communication networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 8, pp. 1534–1548, Aug 2015.
- [10] T. A. Zewde and M. C. Gursoy, "Wireless-powered communication under statistical quality of service constraints," in *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2016, pp. 1–6.
- [11] H. Ju and R. Zhang, "Throughput maximization in wireless powered communication networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 418–428, January 2014.
- [12] H. Ju and R. Zhang, "Optimal resource allocation in full-duplex wireless-powered communication network," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 10, pp. 3528–3540, Oct 2014.
- [13] F. Zhao, L. Wei, and H. Chen, "Optimal time allocation for wireless information and power transfer in wireless powered communication systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 3, pp. 1830–1835, March 2016.

[۱۴] علوی، بیات، «ارسال تصویر از طریق سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی با تخصیص توان ارسالی نامتقارن»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵ شماره ۴، صفحه ۱۵۲–۱۳۹، زمستان ۱۳۹۴.

- [15] M. Sauter, *Probability, From GSM to LTE-Advanced, an Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*, John-Wiley&Sons, 2014.
- [16] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, McGraw-Hill, 2002.
- [17] E. W. Weisstein. *Lambert w-function*. [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/LambertW-Function.html>

فروسو جهت تغذیه بی‌سیم گره و بازه زمانی فراسو جهت ارسال داده‌های گره به HAP را مساوی فرض کردیم و سپس بازه‌های زمانی بهینه و تخصیص توان بهینه در HAP را جهت کمینه‌سازی تأخیر ارسال داده‌ها از گره به HAP محاسبه کردیم. در مسئله دوم فرض تساوی بازه‌های زمانی فروسو و فراسو را نداشتیم و در این شرایط بازه‌های زمانی بهینه و تخصیص توان بهینه در HAP را جهت کمینه‌سازی محاسبه کردیم. در نهایت نیز نتایج را مقایسه کردیم. نتایج مسئله اول و دوم در SNR های میانی تقریباً برابر بودند ولی در SNR های بالا و پایین، متوسط تأخیر ارسال در مسئله دوم کمتر از نتایج مسئله اول بود؛ بنابراین در SNR های بالا و پایین، مساوی فرض نکردن بازه‌های زمانی فروسو و فراسو به همراه تخصیص توان بهینه در HAP، نتایج بهتری را از نظر تأخیر ارسال خواهد داشت.

### پیوست‌ها

تابع Lambert W که در این مقاله به فرم  $\mathcal{W}_0(x)$  نشان داده شده است، درواقع تابع معکوس تابع  $f(x) = xe^x$  است؛ به عبارت دیگر،  $\mathcal{W}_0(x)e^{\mathcal{W}_0(x)} = x$  به این ترتیب می‌شود  $\mathcal{W}_0(x) = f^{-1}(xe^x)$  [۱۷]. حالا معادله (۱۶) را به فرم ساده‌شده زیر در نظر بگیرید:

$$e^X X^2 = A \quad (51)$$

در این رابطه  $X = \ln(1 + \alpha^* \gamma_0)$  و  $A = \frac{2 \ln 2 \gamma_0 R_0}{B \mu^*}$  است. چون  $X \geq 0$  است، طرفین رابطه را به توان رسانده و رابطه (۵۱) را به صورت (۵۲) بازنویسی می‌کنیم.

$$e^{X/2} X = \sqrt{A} \quad (52)$$

سپس مجدداً متغیر  $Y$  را به صورت  $Y = X/2$  تعریف کرده و رابطه (۵۲) را به صورت (۵۳) که همان تعریف تابع Lambert W است، می‌نویسیم.

$$e^Y Y = \frac{\sqrt{A}}{2} \quad (53)$$

حالا می‌توانیم  $Y$  را برحسب تابع Lambert W برابر

$$Y = \mathcal{W}_0\left(\frac{\sqrt{A}}{2}\right) \quad (54)$$

بنویسیم. با جایگزین کردن مقادیر اولیه  $Y$ ،  $X$  و  $A$ ، ضریب تخصیص توان  $\alpha^*$  مساوی رابطه (۱۷) نوشته می‌شود.

### مراجع

- [1] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless charging technologies: fundamentals, standards, and network applications," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1413–1452, Secondquarter 2016.
- [2] M. L. Ku, W. Li, Y. Chen, and K. J. R. Liu, "Advances in energy harvesting communications: past, present, and future challenges," *IEEE Communications Surveys*

## زیرنویس‌ها

---

<sup>5</sup> Massive MIMO

<sup>6</sup> Global System for Mobile communication (GSM)

<sup>7</sup> Long-Term Evolution (LTE)

<sup>8</sup> Signal to Noise Ratio (SNR)

<sup>1</sup> Wireless Powered Communications (WPC)

<sup>2</sup> Hybrid Access Point (HAP)

<sup>3</sup> Downlink (DL)

<sup>4</sup> Uplink (UL)