

# طراحی سیستم مخابراتی تغذیه شده بی سیم با برداشتگر انرژی غیر خطی

مهرنوش میرحاج، مریم مسجدی و محمدفرزان صباحی

بی سیم برطرف شده و همچنین منجر به کاهش مصرف کربن و کاهش ایجاد مواد سمی در طبیعت می شود [۷]. شبکه های مبتنی بر برداشت انرژی به طور عمده به سه دسته برداشت انرژی بی سیم<sup>۴</sup> (WET)، ارسال همزمان انرژی و اطلاعات<sup>۵</sup> (SWIPT) و شبکه های تغذیه شده بی سیم<sup>۶</sup> (WPCN) تقسیم می شوند. در WET، سیگنال انرژی از فرستنده های اختصاصی انرژی به گیرنده های انرژی ارسال می شود [۸]. در فناوری SWIPT، سیگنال انرژی و اطلاعات به صورت همزمان از فرستنده به گیرنده ارسال می شود [۹]. در شبکه های WPCN در فاز فرسو سیگنال انرژی از فرستنده به کاربران ارسال می شود. کاربران با استفاده از انرژی برداشت شده در فاز قبل، سیگنال های اطلاعات خود را به فرستنده در فاز فرسو ارسال می کنند [۱۰]. شبکه های WPCN در کاربردهای با مصرف توان کم مانند شبکه های حسگر بی سیم و تگ های (RFID)<sup>۷</sup> کاربرد دارند. همچنین کاربردهای بالقوه بسیاری در مخابرات نسل ۵ و ۶ در شبکه های اینترنت اشیا و مخابرات ماشین به ماشین برای آنها وجود دارد [۱۱].

در [۱۲] یک شبکه مخابراتی تغذیه شده بی سیم در نظر گرفته شده که در آن HAP<sup>۸</sup> دارای تک آنتن بوده و سیگنال انرژی را برای کاربران تک آنتنی در فاز فرسو در شبکه ارسال می کند. سپس کاربران پس از برداشت انرژی، اطلاعات را در فاز فرسو برای HAP ارسال می کنند. در این پژوهش برای جلوگیری از تداخل بین کاربران، از فناوری دسترسی چندگانه تقسیم زمان<sup>۹</sup> (TDMA) استفاده شده است. مسئله مورد نظر در این پژوهش، طراحی زمان تخصیص داده شده به ارسال انرژی و زمان های تخصیص یافته به کاربران برای ارسال اطلاعات با هدف بیشینه کردن مجموع نرخ کاربران با در نظر گرفتن عدالت و حل مسئله نزدیک- دور مضاعف<sup>۱۰</sup> می باشد. در [۱۳] یک شبکه مخابراتی با تغذیه بی سیم در نظر گرفته شده است که HAP دارای چندین آنتن و کاربران تک آنتنی هستند. در این پژوهش کاربران ابتدا انرژی برداشت کرده و سپس اطلاعات خود را ارسال می کنند، بنابراین از فناوری برداشت و سپس ارسال استفاده شده است. در این روش جهت بهبود عملکرد سیستم، ارسال اطلاعات توسط کاربران به صورت همزمان صورت گرفته

چکیده: در این مقاله، یک شبکه مخابراتی تغذیه شده بی سیم چندکاربره در نظر گرفته شده که در آن کاربران و ایستگاه پایه ترکیبی به چند آنتن مجهز هستند. در فاز فرسو، ایستگاه پایه ترکیبی، سیگنال انرژی را برای کاربران ارسال کرده و در فاز فرسو، کاربران با استفاده از انرژی برداشت شده در فاز قبل، اطلاعات خود را با استفاده از فناوری دسترسی چندگانه فضایی به ایستگاه پایه ترکیبی ارسال می کنند. با در نظر گرفتن مدل عملی غیر خطی برای برداشتگر انرژی و با هدف بیشینه کردن مجموع نرخ، روشی بهینه را برای طراحی ماتریس پیش کدگذار انرژی، ماتریس های پیش کدگذار اطلاعات کاربران و زمان اختصاص یافته به فاز فرسو و فراسو پیشنهاد می دهیم. به این منظور با استفاده از تغییر متغیرهای مناسب، مسئله را به صورت یک مسئله بهینه سازی محدب بازنویسی کرده و روشی برای حل آن ارائه می کنیم. نتایج شبیه سازی نشان می دهند که در شرایط عملی، با لحاظ رفتار غیر خطی برای برداشتگر در طراحی، انرژی ارسالی کاهش و مجموع نرخ افزایش می یابد.

کلیدواژه: برداشت انرژی، شبکه های مخابراتی تغذیه شده بی سیم، برداشتگر انرژی غیر خطی، جهت دهی پرتو انرژی، سیستم چندورودی- چندخروجی.

## ۱- مقدمه

با پیشرفت چشم گیر فناوری مخابرات بی سیم، تعداد دستگاه های بی سیم در شبکه افزایش قابل توجهی داشته است. یکی از مهم ترین چالش های موجود در شبکه های بی سیم، مسئله مدیریت و تأمین انرژی است. در سال های اخیر تغذیه بی سیم انرژی<sup>۱</sup> (WPT) توسط امواج رادیویی، به عنوان یک روش مؤثر و کارآمد برای تأمین انرژی تجهیزات شبکه معرفی شده است [۱] تا [۶]. برداشت انرژی<sup>۲</sup> (EH) از طریق امواج رادیویی<sup>۳</sup> (RF)، به علت افزایش هزینه های ناشی از تأمین انرژی و نگرانی های مربوط به زوال محیط زیست یک راهکار کارآمد و مؤثر در بهبود عملکرد و افزایش طول عمر شبکه های مخابرات بی سیم است. با استفاده از این فناوری نیاز به تعویض و یا شارژ مرتب باتری در شبکه های

این مقاله در تاریخ ۲۰ آبان ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۲۷ فروردین ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

مهرنوش میرحاج، گروه مخابرات سیستم، مؤسسه آموزشی صفاهان، اصفهان، ایران، (email: mehrnush.mirhaj@yahoo.com)

مریم مسجدی، گروه مخابرات سیستم، مؤسسه آموزشی صفاهان، اصفهان، ایران، (email: mmasjedy@yahoo.com)

محمدفرزان صباحی (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، (email: mohamad\_farzan@yahoo.com)

1. Wireless Power Transfer
2. Energy Harvesting
3. Radio Frequency

4. Wireless Energy Transfer

5. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

6. Wireless Powered Communication Networks

7. Radio Frequency Identification

8. Hybrid Access Point

9. Time Division Multiple Access

10. Doubly-Near-Far

HAP و کاربران به چند آنتن مجهز هستند. ایستگاه پایه ترکیبی در فاز فرسو، سیگنال انرژی را برای کاربران ارسال کرده و در فاز فراسو، کاربران با استفاده از انرژی برداشت شده در فاز قبل، اطلاعات خود را با استفاده از فناوری دسترسی چندگانه فضایی به ایستگاه پایه ترکیبی ارسال می کنند. هدف در این پژوهش، پیشینه سازی مجموع نرخ با در نظر گرفتن مدل خطی برای برداشتگر انرژی و روشی بهینه برای طراحی ماتریس های پیش کدگذار انرژی، ماتریس های پیش کدگذار اطلاعات کاربران و تخصیص زمان در شبکه است.

در اکثر تحقیقات انجام شده در شبکه های مبتنی بر برداشت انرژی و به منظور ساده سازی، رابطه توان ورودی و خروجی برداشتگر به صورت خطی مدل شده است [۲۲]. از طرفی با توجه به ساختار مدارهای برداشتگر و استفاده از المان های غیر خطی، می دانیم که در عمل رابطه توان ورودی و خروجی برداشتگر را نمی توان به صورت خطی مدل کرد [۲۳] تا [۲۶]. بنابراین در نظر گرفتن این موضوع در مسئله طراحی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این مقاله، یک شبکه WPCN چندکاربره چندآنتنی را در نظر می گیریم و با در نظر گرفتن مدل دوخطی برای برداشتگر، مسئله طراحی ماتریس های کواریانس سیگنال انرژی، اطلاعات و زمان تخصیص یافته به فاز فراسو و فرسو را با هدف پیشینه سازی مجموع نرخ کاربران فرمول بندی می کنیم. سپس با تغییر متغیرهای مناسب، آن را به مسئله محدب قابل حل با روش های استاندارد بهینه سازی محدب تبدیل خواهیم کرد. باید توجه داشت که برخلاف بسیاری از مراجع (به عنوان مثال [۱۸]) که از روش TDMA در فاز فراسو استفاده کرده اند، در این مقاله از روش دسترسی چندگانه فضایی SDMA برای مدیریت تداخل استفاده شده که در آن ارسال اطلاعات کاربران به صورت هم زمان و در یک باند فرکانسی انجام می گیرد.

در بخش دوم مقاله، مدل سیستم و سیگنال را ارائه می دهیم. در بخش سوم، مدل برداشتگر انرژی خطی و دوخطی را توصیف می کنیم و در بخش چهارم، مسئله پیشینه سازی مجموع نرخ کاربران را فرمول بندی می کنیم و روشی برای حل آن ارائه می دهیم. در بخش پنجم، نتایج شبیه سازی در سناریوهای مختلف را ارائه می دهیم و نهایتاً در بخش ششم نتیجه گیری بیان می گردد.

نمادهای استفاده شده در این مقاله به شرح زیر است: حروف بزرگ بولد ایتالیک نماد ماتریس و حروف کوچک بولد ایتالیک نماد بردار است. همچنین  $\{tr\}$  بیانگر اثر ماتریس،  $I_M$  بیانگر ماتریس همانی با بعد  $M$ ،  $(\cdot)_i^H$  بیانگر عملگر ترانپوز مختلط و  $\{E\}$  بیانگر امید ریاضی است. همچنین  $C^{M \times N}$  بیانگر فضای گسترده شده توسط ماتریس های مختلط با بعد  $M \times N$  و  $\|\cdot\|$  نماد دترمینان ماتریس است. نماد  $x \sim CN(M, C)$  بیانگر بردار تصادفی  $x$  با توزیع گوسی مختلط (CCSG) با بردار میانگین  $M$  و ماتریس کواریانس  $C$  است.

## ۲- مدل سیستم

مطابق شکل ۱ سیستم مورد نظر یک سیستم WPCN چندکاربره MIMO است. در این سیستم HAP مجهز به  $M$  آنتن بوده و به  $K$  آنتنی سرویس می دهد. فرض می کنیم که HAP دارای منبع ثابت انرژی بوده ولی کاربران فاقد آن هستند و انرژی دریافتی از HAP را برای ارسال اطلاعات استفاده می کنند. در فاز فرسو با مدت  $\tau$ ، HAP سیگنال انرژی را برای کاربران ارسال می کند. در این فاز، کاربران به برداشت

و از روش<sup>۱</sup> (SDMA) استفاده شده است. هدف از این پژوهش به دست آوردن بیشینه حداقل نرخ کاربران در کانال فراسو است. همچنین از تکنیک جهت دهی پرتو که روش مؤثری جهت بهبود عملکرد سیستم است، استفاده شده و ماتریس های شکل دهی پرتو ارسال انرژی، دریافت اطلاعات و همچنین تخصیص زمان و توان طراحی شده است. در [۱۴] و [۱۵]، شبکه مخابراتی تغذیه شده بی سیم در نظر گرفته شده که جهت بهبود عملکرد سیستم، در آن از HAP با پروتکل دوسویه استفاده شده است. در این تحقیقات، HAP شامل دو آنتن یکی برای ارسال سیگنال انرژی به کاربران در فاز فرسو و دیگری برای دریافت اطلاعات کاربران در فاز فراسو است. همچنین جهت بهبود عملکرد سیستم، ارسال انرژی و دریافت اطلاعات به صورت هم زمان انجام شده است و کاربران برای ارسال اطلاعات از روش TDMA استفاده می کنند. همچنین هدف از پژوهش، محاسبه بیشینه مجموع گذردهی در این شبکه است و برای جلوگیری از تداخل بین سیگنال انرژی و سیگنال اطلاعات از روش های حذف خودتداخلی<sup>۲</sup> استفاده شده است، زیرا سیگنال انرژی و سیگنال اطلاعات در یک باند فرکانسی قرار دارند. در [۱۶] و [۱۷] یک شبکه WPCN چندکاربره در نظر گرفته شده است و جهت ارسال انرژی و دریافت اطلاعات از روش دسترسی چندگانه تقسیم زمان TDMA، استفاده شده است. در این مراجع با هدف پیشینه سازی نرخ مجموع، تخصیص زمان و توان به صورت بهینه انجام شده است. در [۱۸] یک شبکه مخابراتی WPCN چندآنتنی بررسی گردیده که کاربران، ایستگاه انرژی و اطلاعات به چند آنتن مجهز شده اند و از روش TDMA برای ارسال سیگنال انرژی و اطلاعات استفاده شده است. در این پژوهش، اثر عدم قطعیت در اطلاعات حالت کانال و همچنین، غیر خطی بودن مدار برداشتگر در طراحی ماتریس های شکل دهی پرتو و تخصیص زمان در نظر گرفته شده است. برای طراحی، دو مسئله بهینه سازی در نظر گرفته شده که یکی به پیشینه سازی مجموع گذردهی در شبکه و دیگری به پیشینه سازی کمینه گذردهی همه کاربران می پردازد. در [۱۹]، یک شبکه WPCN با یک HAP چندآنتنی و دوسویه و تعدادی کاربر تک آنتنی و تک سویه در نظر گرفته شده است. بردارهای شکل دهی پرتو HAP، تخصیص زمان و توان کاربران با هدف پیشینه کردن نرخ مجموع وزن دار طراحی شده است. در این پژوهش، رفتار غیر خطی برداشتگر انرژی در مدل سازی مسئله در نظر گرفته شده است. در [۲۰]، یک شبکه WPCN در نظر گرفته شده که HAP چندآنتنی و کاربران تک آنتنی هستند. تخصیص زمان، توان کاربران و ماتریس شکل دهی پرتو HAP در فاز ارسال انرژی با هدف کمینه کردن توان ارسال طراحی شده اند. همچنین در مسئله بهینه سازی حاصل، قیدی برای تضمین کیفیت سرویس هر کاربر نیز لحاظ شده است. در [۲۱]، یک سیستم WPCN مبتنی بر رله در نظر گرفته شده که در آن، ارتباط بین کاربران و نقطه دسترسی<sup>۳</sup> (AP) از طریق یک رله انجام می گیرد. کاربران و AP تک آنتنی، رله دوآنتنی و ایستگاه انرژی چندآنتنی در نظر گرفته شده است. بردار شکل دهی پرتو سیگنال انرژی و تخصیص زمان و توان کاربران با هدف پیشینه کردن گذردهی سیستم طراحی شده است. در این پژوهش، از مدل دوتکه ای خطی برای مدل سازی رفتار غیر خطی برداشتگر استفاده شده است. در [۲۲] یک شبکه WPCN چندکاربره در نظر گرفته شده است که در آن

1. Space Division Multiple Access
2. Self-Interference Cancellation
3. Access Point

### ۳- مدل برداشتگر انرژی

در مراجع، انرژی برداشت شده توسط کاربر  $i$  ام در فاز فرسو، عمدتاً به صورت خطی مدل می‌شود و  $P_{L,i}$  توان خروجی برداشتگر انرژی کاربر  $i$  ام، طبق (۵) محاسبه می‌گردد [۲۲]

$$P_{L,i} = \eta_i \text{tr}\{\mathbf{G}_i \mathbf{Q} \mathbf{G}_i^H\} \quad (5)$$

که  $0 < \eta_i \leq 1$  ضریب بازده توان برداشتگر کاربر  $i$  ام،  $\mathbf{G}_i$  ماتریس کانال از HAP به کاربر  $i$  ام و  $\mathbf{Q}$  ماتریس کواریانس انرژی است. در مدل خطی، ضریب بازده توان، مستقل از توان ورودی برداشتگر در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر توان خروجی برداشتگر با توان ورودی آن رابطه خطی دارد. اما نتایج آزمایش‌های عملی نشان داده که در عمل، مدارهای برداشتگر انرژی رادیویی، رفتار خطی ندارند. به بیان دقیق‌تر برای توان‌های ورودی کم، رابطه توان ورودی و خروجی برداشتگر خطی بوده و با افزایش توان ورودی، مدار به اشباع رفته و توان خروجی مستقل از میزان توان ورودی به مقدار ثابتی خواهد رسید. بنابراین در نظر گرفتن مدل خطی در طراحی، ممکن است منجر به حصول نتایج زیر بهینه شود [۲۳] تا [۲۶]. مدل‌های غیر خطی مختلفی برای مدل‌سازی رابطه توان ورودی-برداشتگر ارائه گردیده که می‌توان به مدل کسری و دوخطی و زیگمویید اشاره کرد [۲۳] تا [۲۶].

در این مقاله، به منظور مدل‌سازی رفتار غیر خطی برداشتگر از مدل دوخطی ارائه شده در [۲۶] استفاده می‌کنیم. زیرا این مدل، علاوه بر سادگی، از انطباق بالایی با داده‌های عملی برخوردار است [۲۶]. در این مدل، رابطه توان ورودی و خروجی برداشتگر  $i$  ام به صورت (۶) است

$$P_{NL} = \begin{cases} \eta_i P_{in,i} P_{in,i} \leq P_{th} \\ \eta_i P_{th} P_{in,i} > P_{th} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن  $P_{NL}$  توان خروجی برداشتگر در مدل غیر خطی،  $P_{in,i}$  توان ورودی،  $\eta_i$  بازده توان برداشتگر انرژی و  $P_{th}$  آستانه اشباع برداشتگر انرژی است. با جایگذاری (۵) در (۶)، حاصل می‌گردد

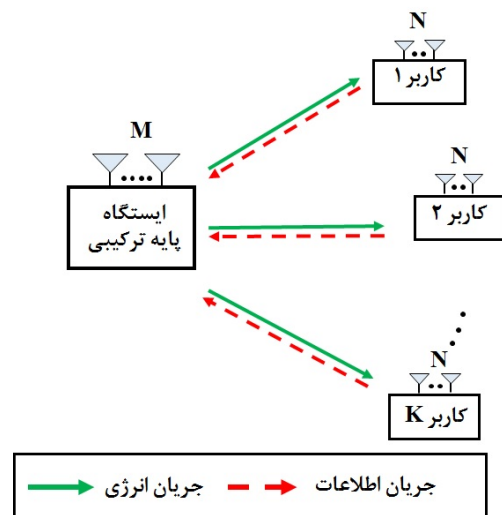
$$P_{NL,i} = \begin{cases} \eta_i \text{tr}\{\mathbf{G}_i \mathbf{Q} \mathbf{G}_i^H\} \text{tr}\{\mathbf{G}_i \mathbf{Q} \mathbf{G}_i^H\} \leq P_{th} \\ \eta_i P_{th} \text{tr}\{\mathbf{G}_i \mathbf{Q} \mathbf{G}_i^H\} > P_{th} \end{cases} \quad (7)$$

### ۴- فرمول‌بندی مسئله

در این قسمت ماتریس‌های کواریانس انرژی  $\mathbf{Q}$ ، کواریانس ارسال اطلاعات کاربران  $\mathbf{S}_i, i=1, \dots, K$  و (کسر) زمان  $\tau$  را به نحوی طراحی خواهیم کرد که مجموع نرخ کاربران، بیشینه شود. بنابراین مسئله بهینه‌سازی طبق (۸) محاسبه می‌گردد

$$\begin{aligned} & \max_{\tau, \mathbf{Q}, \{\mathbf{S}_i\}_{i=1}^K} (1-\tau) \log_{\tau} \left| \mathbf{I}_M + \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^H \right| \\ & \text{s.t. } (1-\tau) \text{tr}\{\mathbf{S}_i\} \leq \tau P_{NL,i}, i=1, \dots, K \\ & \text{tr}\{\mathbf{Q}\} \leq P_{\max} \\ & 0 \leq \tau \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن، قید اول به این معناست که انرژی ارسال شده توسط کاربران در فاز فرسو باید کوچک‌تر یا مساوی انرژی برداشت شده در فاز فرسو باشد. قید دوم، قید محدودکردن توان HAP است. قید سوم نیز مطابق با این فرض است که مجموع زمان فرسو و فراسو به یک نرمالیزه شده است. با توجه به فرم قید اول که ضرب متغیرهای بهینه‌سازی در یکدیگر است، می‌توان نتیجه گرفت که مسئله (۸) غیر محدب است و برای تبدیل



شکل ۱: مدل شماتیک WPCN چندکاربره و MIMO.

انرژی از سیگنال ارسالی HAP می‌پردازند. در فاز فراسو به مدت  $T - \tau$ ، کاربران با استفاده از انرژی برداشت شده در فاز قبل، اطلاعات خود را به HAP ارسال می‌کنند. دوره عملکرد سیستم (مجموع مدت زمان فاز فراسو و فرسو) بوده و بدون از دست دادن کلیت می‌توان  $T$  را برابر با یک در نظر گرفت.

در فاز فرسو، HAP سیگنال انرژی  $\mathbf{x} \in C^{M \times 1}$  با ماتریس کواریانس  $E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\} = \mathbf{Q} \in C^{M \times M}$  طبق (۱) حداکثر توان قابل ارسال توسط HAP برابر است با

$$\text{tr}\{\mathbf{Q}\} \leq P_{\max} \quad (1)$$

که  $\mathbf{Q}$  ماتریس کواریانس انرژی و  $P_{\max}$  حداکثر توان قابل ارسال توسط HAP است. در این صورت، بردار دریافتی در گیرنده کاربر  $i$  ام یعنی  $\mathbf{r}_i \in C^{N \times 1}$  طبق (۲) محاسبه می‌شود

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{G}_i \mathbf{x} + \mathbf{n}_i \quad (2)$$

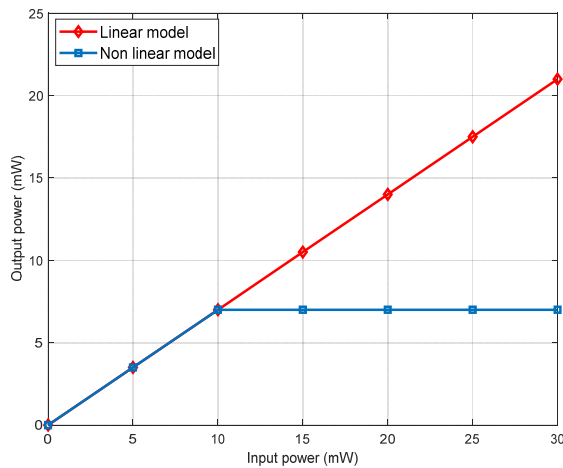
که در آن  $\mathbf{G}_i$  ماتریس کانال از HAP به کاربر  $i$  ام بوده و  $\mathbf{n}_i$  نویز جمع‌شونده است. به دلیل کوچک بودن توان نویز نسبت به توان سیگنال دریافتی، معمولاً در محاسبه انرژی از آن صرف نظر می‌شود [۲۲]. در فاز فراسو، کاربران با استفاده از انرژی برداشت شده در فاز قبل، اطلاعات خود را به صورت هم‌زمان با استفاده از فناوری SDMA به HAP ارسال می‌کنند. اگر  $\mathbf{s}_i \in C^{N \times 1}$  بردار ارسال شده توسط کاربر  $i$  ام باشد، بردار دریافت شده در HAP برابر با (۳) است

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{z} \quad (3)$$

که  $\mathbf{H}_i$  ماتریس کانال از کاربر  $i$  به HAP بوده و  $\mathbf{z} \sim CN(0, \mathbf{I}_M)$  بردار نویز گوسی جمع‌شونده در HAP است. فرض می‌کنیم HAP از روش حذف تداخل پی‌درپی برای کدگذاری اطلاعات استفاده می‌کند. در این صورت، مجموع نرخ کاربران طبق (۴) محاسبه می‌گردد [۲۲]

$$R = (1-\tau) \log_{\tau} \left| \mathbf{I}_M + \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_i \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i^H \right| \quad (4)$$

که در آن  $\mathbf{S}_i = E\{\mathbf{s}_i \mathbf{s}_i^H\} \in C^{N \times N}$  ماتریس کواریانس ارسال اطلاعات کاربر  $i$  ام است.



شکل ۳: توان ورودی و خروجی برداشتر انرژی با مدل غیر خطی و خطی.

بنابراین قید اول از (۸) به صورت زیر درمی آید

$$\tau(1-\tau)[\text{tr}\{\mathbf{S}_i\} + P_{C,i}] \leq \tau P_{NL,i} \quad (14)$$

واضح است که با اضافه شدن عبارت خطی (بر حسب  $\tau$ ) به قید دوم مسئله (۸)، تحب مسئله حفظ شده و با اندکی تغییر می توان از الگوریتم ارائه شده در شکل ۲ برای حل آن استفاده کرد.

### ۵- نتایج شبیه سازی

در این بخش برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی، شبیه سازی هایی در سناریوهای مختلف انجام گردیده است و در تمام شبیه سازی ها،  $\eta_i = 0.7, i = 1, \dots, K$  بازده برداشتر کاربر  $i$  ام، توان نویز برابر با  $-50$  dBm و کانال ها به صورت مستقل و با محوشدگی رابلی در نظر گرفته شده اند [۲۲]. فاصله کاربران تا HAP،  $10 \leq d \leq 2$  و نمای تضعیف مسیر  $2/5$  می باشد. همچنین  $M = N = K = 4$  و آستانه اشباع برداشتر  $P_{th} = 10$  mw لحاظ شده است (مگر آن که خلاف آن ذکر شود).

نمودار توان ورودی و خروجی برداشتر انرژی با مدل غیر خطی و خطی در شکل ۳ آمده است. همچنین در سناریوهایی که در ادامه آمده است، فاصله کاربران تا HAP را برابر با  $d$  و نمای تضعیف مسیر را برابر با  $2/5$  در نظر گرفتیم.

فرض می کنیم که برداشتر از مدل غیر خطی (عملی) تبعیت می کند و اثر لحاظ یا عدم لحاظ این امر در مسئله طراحی را بررسی می کنیم. در شکل ۴، نمودار توان ارسال شده توسط HAP بر حسب فاصله به ازای (مدل خطی) ترسیم شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، در صورتی که اثر اشباع برداشتر در مسئله طراحی لحاظ نشود، HAP از حداکثر توان قابل ارسال برای انتقال انرژی استفاده می کند. در صورت لحاظ اثر اشباع برداشتر در مسئله طراحی، توان ارسال HAP، کوچک تر یا مساوی توان حداکثر خواهد بود. اگر وضعیت کانال طوری باشد که برداشتر به اشباع برود، HAP توان ارسال را کم می کند چرا که افزایش آن اثری در میزان انرژی برداشت شده توسط کاربر و در نتیجه، افزایش نرخ نخواهد داشت. به طور مثال برای  $P_{max} = -10$  dB، در فواصل کمتر از شش متر، در صورتی که HAP با حداکثر توان ارسال کند، برداشتر غالباً به اشباع می رود. در نتیجه در این فواصل، توان ارسال HAP از  $P_{max} = -10$  dB کمتر است. در فواصل بیشتر از شش متر، به دلیل تضعیف مسیر، توان دریافت شده در برداشتر کمتر از حد اشباع بوده و

(۱) مقداردهی اولیه پارامترها را به فرم  $a = 0, b = 1$  و  $\phi = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}$  انجام بده.

(۲) قرار بده:  $\tau_r = a + \phi(b-a)$  و  $\tau_l = b - \phi(b-a)$ .

(۳) برای  $\tau = \tau_r$  و  $\tau = \tau_l$  مسئله (۱۲) را حل کن و  $R(\tau_r)$  و  $R(\tau_l)$  را محاسبه کن.

(۴) اگر  $R(\tau_r) < R(\tau_l)$ ، قرار بده  $b = \tau_r$  و در غیر این صورت  $a = \tau_r$ .

(۵) مراحل ۲ تا ۴ را تکرار کن تا  $|b-a|$  همگرا شود.

(۶) مقادیر بهینه را به صورت مقابل محاسبه کن:  $\tau^* = \frac{b+a}{2}$ ،  $\mathbf{Q}^* = \frac{\mathbf{W}^*}{\tau^*}$  و

$$\mathbf{S}_i^* = \frac{\mathbf{V}_i^*}{1-\tau^*}$$

شکل ۲: الگوریتم تکرار پیشنهادی برای حل مسئله بیشینه کردن نرخ با لحاظ اثر غیر خطی برداشتر [۲۲].

آن به یک مسئله محدب، تغییر متغیرهای زیر را انجام می دهیم

$$\mathbf{W} = \tau \mathbf{Q} \quad (9)$$

$$\mathbf{V}_i = (1-\tau)\mathbf{S}_i, i = 1, \dots, K$$

با اعمال تغییر متغیر  $\mathbf{W} = \tau \mathbf{Q}$ ، به صورت (۱۰) قابل بازنویسی است

$$\tau P_{NL,i} = \begin{cases} \eta_i \text{tr}\{\mathbf{G}_i \mathbf{W} \mathbf{G}_i^H\} \text{tr}\{\mathbf{G}_i \mathbf{W} \mathbf{G}_i^H\} \leq \tau P_{th} \\ \eta_i \tau P_{th} \text{tr}\{\mathbf{G}_i \mathbf{W} \mathbf{G}_i^H\} > \tau P_{th} \end{cases} \quad (10)$$

رابطه فوق را می توان به فرم (۱۱) بازنویسی کرد

$$\tau P_{NL,i} = \eta_i \min\{\text{tr}\{\mathbf{G}_i \mathbf{W} \mathbf{G}_i^H\}, \tau P_{th}\} \quad (11)$$

حال با تغییر متغیر  $\mathbf{V}_i = (1-\tau)\mathbf{S}_i, i = 1, \dots, K$ ، مسئله را به صورت (۱۲) بازنویسی می کنیم

$$\begin{aligned} \max_{\tau, \mathbf{W} \geq 0, \{\mathbf{V}_i\}_{i=1}^K \geq 0} & (1-\tau) \log_{\tau} \left| \mathbf{I}_M + \frac{1}{1-\tau} \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_i \mathbf{V}_i \mathbf{H}_i^H \right| \\ \text{s.t. } & \text{tr}\{\mathbf{V}_i\} \leq \eta_i \min\{\text{tr}\{\mathbf{G}_i \mathbf{W} \mathbf{G}_i^H\}, \tau P_{th}\}, i = 1, \dots, K \\ & \text{tr}\{\mathbf{W}\} \leq \tau P_{max} \\ & 0 \leq \tau \leq 1 \end{aligned} \quad (12)$$

تذکره: تابع لگاریتم دترمینان یک ماتریس مثبت معین، یک تابع مقعر نسبت به آن ماتریس است. تابع هدف مسئله بالا، نیز پرسپکتیو تابع لگاریتم دترمینان ماتریس مثبت معین بوده و در نتیجه نسبت به  $\{\mathbf{V}_i\}_{i=1}^K$  و  $\tau$ ، مقعر است [۲۷]. عبارت سمت چپ قید اول مسئله، یک تابع خطی و عبارت سمت راست آن مینیمم دو تابع خطی و در نتیجه تابعی مقعر است [۲۷]. بنابراین مجموعه حاصل از قید اول محدب است. قید دوم و سوم نیز خطی و در نتیجه محدب هستند. بنابراین مسئله فوق محدب بوده و با استفاده از روش های استاندارد برای حل مسایل محدب، قابل حل است. برای حل این مسئله، با توجه به تحب می توان یک الگوریتم تکرار مبتنی بر اصول زیر ارائه داد (شکل ۲):

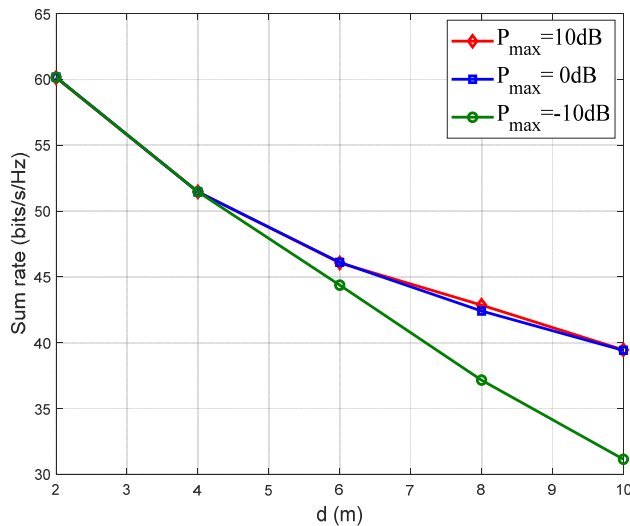
(۱) محاسبه  $\tau$  با استفاده از روش نصف کردن بازه (روش مشابه با روش ارائه شده در [۲۲]).

(۲) حل مسئله (۱۲) با فرض ثابت بودن  $\tau$  (با استفاده از ابزارهای استاندارد برای حل مسایل محدب مانند CVX [۲۸]).

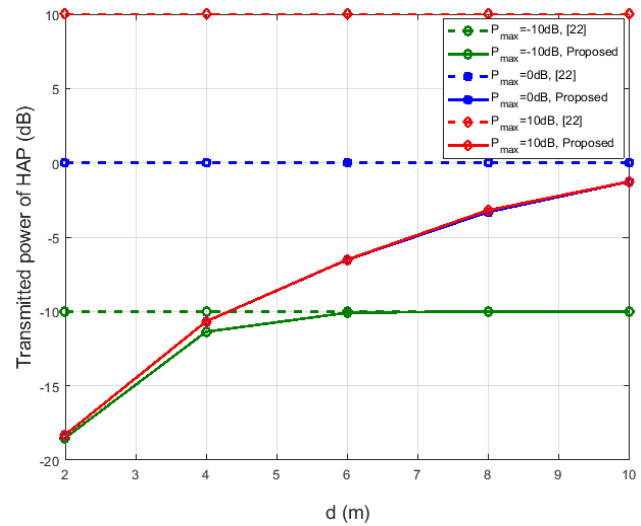
نهایتاً الگوریتم پیشنهادی در شکل ۲ خلاصه شده است.

تذکره: برای وارد کردن انرژی مدارات در برآورد انرژی مصرفی، با نشان دادن توان مصرفی کاربر  $i$  ام با  $P_{C,i}$ ، انرژی مصرفی کاربر  $i$  ام به صورت زیر قابل بازنویسی است

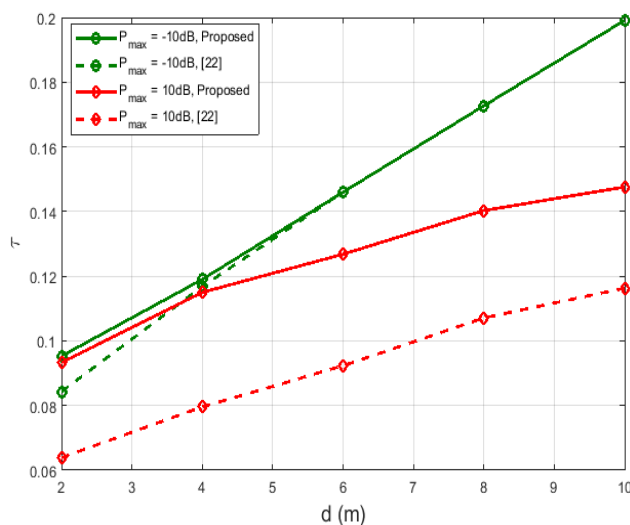
$$E_i = (1-\tau)\text{tr}\{\mathbf{S}_i\} + (1-\tau)P_{C,i} \quad (13)$$



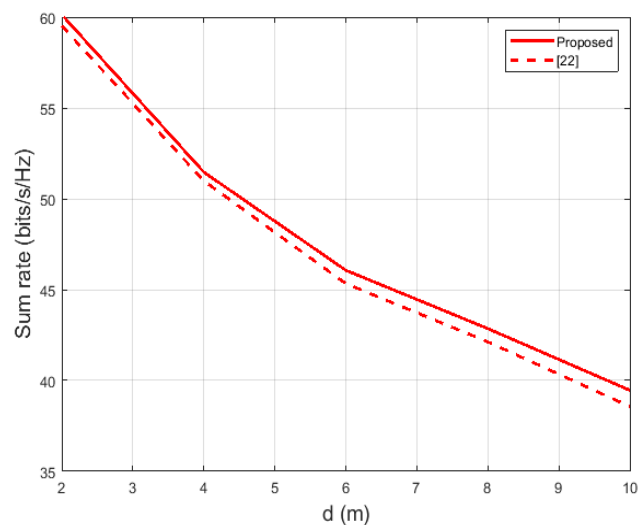
شکل ۳: مجموع نرخ بر حسب فاصله به ازای  $P_{\max} = -10, 0, 10\text{dB}$ .



شکل ۴: نمودار توان ارسال شده توسط HAP بر حسب فاصله.



شکل ۵: تخصیص زمان فروسو و فراسو بر حسب فاصله.



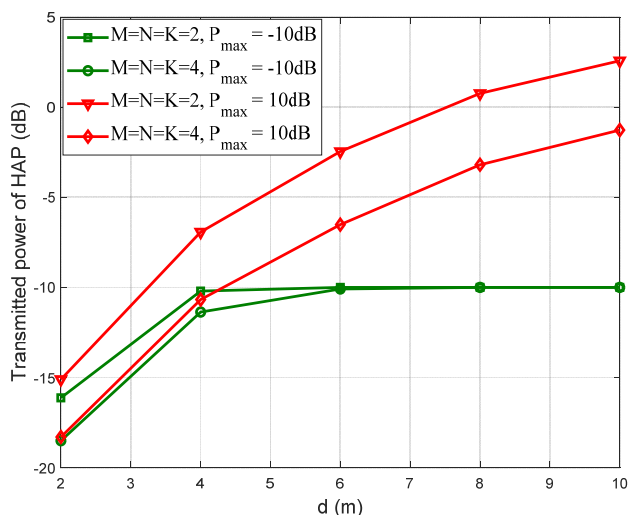
شکل ۶: مجموع نرخ بر حسب فاصله به ازای  $P_{\max} = 10\text{dB}$ .

برای بررسی اثر افزایش توان ماکسیمم HAP بر مجموع نرخ، نمودار مجموع نرخ بر حسب فاصله به ازای  $P_{\max} = -10, 0, 10\text{dB}$  در شکل ۳ ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش  $P_{\max}$  تا جایی که برداشتگر وارد ناحیه اشباع خود نشود، موجب افزایش نرخ می‌شود. در فواصل کوتاه که تضعیف مسیر کم است، در غالب موارد برداشتگر به اشباع می‌رود و در نتیجه، افزایش  $P_{\max}$  تأثیری بر مجموع نرخ نخواهد گذاشت. در فواصل بیشتر، افزایش از  $-10\text{dB}$  به  $0\text{dB}$ ، موجب افزایش نرخ می‌شود. همچنین می‌توان مشاهده نمود که به دلیل پدیده اشباع، افزایش  $P_{\max}$  از  $0\text{dB}$  به  $10\text{dB}$ ، اثری در مجموع نرخ نداشته است.

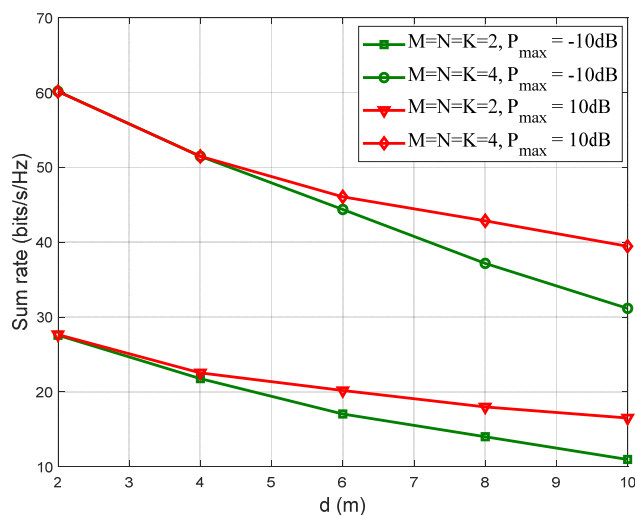
تخصیص زمان بین فروسو و فراسو  $\tau$ ، بر حسب فاصله به ازای  $P_{\max} = -10, 10\text{dB}$  با لحاظ مدل عملی (غیر خطی) و عدم لحاظ آن (مدل خطی [۲۲]) در شکل ۷ ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله،  $\tau$  نیز افزایش یافته است. زیرا با افزایش فاصله و افزایش تضعیف مسیر، هم انرژی دریافتی در گیرنده کاهش می‌یابد و هم انرژی لازم برای ارسال اطلاعات افزایش می‌یابد و بنابراین (کسر) زمان برای انتقال انرژی در فروسو بیشتر شده است. همچنین واضح است که با افزایش  $P_{\max}$  (تا جایی که برداشتگر به اشباع نرود)، زمان مورد نیاز برای ارسال/دریافت انرژی کاهش می‌یابد. همچنین لحاظ اثر اشباع در طراحی، باعث افزایش  $\tau$  شده است. زیرا در این حالت، انرژی دریافتی

برداشتگر به اشباع نمی‌رود. بنابراین HAP از حداکثر توان خود برای ارسال استفاده کرده است. همچنین می‌توان مشاهده نمود که به دلیل پدیده اشباع، افزایش  $P_{\max}$  از  $0\text{dB}$  به  $10\text{dB}$ ، اثری در توان ارسال (در فواصل مورد بررسی) نداشته است. بنابراین در حالت کلی، با لحاظ رفتار غیر خطی برای برداشتگر، می‌تواند مصرف انرژی HAP را کاهش دهد.

نمودار مجموع نرخ بر حسب فاصله به ازای  $P_{\max} = 10\text{dB}$  با لحاظ مدل عملی (غیر خطی) و عدم لحاظ آن (مدل خطی [۲۲]) ترسیم شده است. برای محاسبه مجموع نرخ مطابق روش ارائه شده در [۲۲]، ابتدا ماتریس‌های شکل‌دهی پرتو و تخصیص زمان فروسو و فراسو را طبق الگوریتم موجود در شکل ۲ انجام می‌دهیم و سپس توان ارسال کاربران را به اندازه توان برداشت شده آنها قرار داده و مجموع نرخ حاصل را محاسبه می‌کنیم. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، مجموع نرخ کاربران در حالتی که مسئله اشباع را در طراحی لحاظ کنیم نسبت به عدم لحاظ آن، بزرگ‌تر است. این تفاوت در سناریوی شکل ۵ به طور متوسط برابر با  $0.5\text{ bits/s/Hz}$  است که با ضرب آن در پهنای باند، مقدار قابل توجهی حاصل می‌شود. باید توجه داشت که در روش پیشنهادی، توان ارسال شده توسط HAP کاهش و نرخ اندکی افزایش یافته است. این امر به دلیل لحاظ کردن مدل دقیق‌تر در مدل‌سازی مسئله طراحی است که منجر به بهبود عملکرد روش حاصل در شرایط عملی می‌شود.



شکل ۹: نمودار توان ارسالی HAP بر حسب فاصله برای تعداد آنتن متفاوت.



شکل ۸: نمودار مجموع نرخ بر حسب فاصله برای تعداد آنتن متفاوت.

جدول ۱: میانگین زمان اجرای برنامه برای روش پیشنهادی و [۲۲].

تعداد آنتن	$M = K = N = 1$	$M = K = 2$ $N = 1$	$M = K = 4$ $N = 1$
روش پیشنهادی	۴٫۶ s	۴٫۸ s	۱۰٫۲ s
مرجع [۲۲]	۴٫۵ s	۴٫۹ s	۱۰٫۱ s

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک سیستم مخابراتی تغذیه‌شده بی‌سیم چندکاربره در نظر گرفته شد که در آن، ایستگاه پایه ترکیبی و کاربران به چند آنتن مجهز هستند. به دلیل این که در حالت عملی، مدارهای برداشتر انرژی رفتار خطی ندارند و برای توان‌های ورودی بالاتر از حد اشباع، قادر به برداشت انرژی متناسب با توان ورودی نیستند، از مدل برداشتر انرژی دوخطی استفاده کردیم. در این حالت، با هدف پیشینه‌کردن مجموع نرخ کاربران، مسئله را فرمول‌بندی نموده و به طراحی ماتریس‌های کواریانس انرژی، اطلاعات کاربران و کسر زمان اختصاصی به فاز فراسو و فرسو پرداختیم. با استفاده از شبیه‌سازی، نشان دادیم که در صورت لحاظ مدل غیر خطی (مدل عملی) در حالت واقعی انرژی ارسالی کاهش و مجموع نرخ افزایش می‌یابد.

## مراجع

- [1] T. A. Zewde and M. C. Gursoy, "Energy-efficient time allocation for wireless energy harvesting communication networks," in *Proc. IEEE Globecom Workshops*, 6 pp., Washington, DC, USA, 2-4 Dec. 2016.
- [2] G. Yang, C. K. Ho, R. Zhang, and Y. L. Guan, "Throughput optimization for massive MIMO systems powered by wireless energy transfer," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 8, pp. 1640-1650, Aug. 2015.
- [3] M. Zheng, W. Liang, and H. Yu, "Utility-based resource allocation in wireless-powered communication networks," *IEEE Systems J.*, vol. 12, no. 4, pp. 3881-3884, Dec. 2018.
- [4] H. Kim, H. Lee, S. Jang, J. Moon, and I. Lee, "Maximization of minimum rate for wireless powered communication networks in interference channel," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 8, pp. 1648-1651, Aug. 2018.
- [5] Z. Yang, W. Xu, Y. Pan, C. Pan, and M. Chen, "Optimal fairness-aware time and power allocation in wireless powered communication networks," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 66, no. 7, pp. 3122-3135, Jul. 2018.
- [6] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, Second Quarter. 2014.
- [7] I. Ahmed, M. M. Butt, C. Psomas, A. Mohamed, I. Krikidis, and M. Guizani, "Survey on energy harvesting wireless communications: challenges and opportunities for radio resource allocation," *Computer Networks*, vol. 88, pp. 234-248, Sept. 2015.
- [8] T. C. Rao and K. Geetha, "Categories, standards and recent trends in wireless power transfer: a survey," *Indian J. of Science and Technology*, vol. 9, no. 20, pp. 1-11, May 2016.

کمتر از حالتی است که برای برداشتر مدل خطی در نظر گرفته شود و در نتیجه، زمان لازم برای ارسال / برداشت انرژی بیشتر می‌شود. برای بررسی اثر افزایش آنتن و کاربر، در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نمودار مجموع نرخ و انرژی ارسالی HAP بر حسب فاصله به ازای  $P_{\max} = -10, 10\text{dB}$  برای  $M = N = K = 2, 4$  ترسیم شده است. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد آنتن، تعداد درجات آزادی مسئله و مجموع نرخ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد آنتن، انرژی ارسال شده توسط HAP (در حالتی که به دلیل اشباع برداشتر ارسال با توان کمتر از  $P_{\max}$  انجام می‌شود) نیز کم می‌شود. لازم به ذکر است که با افزایش تعداد آنتن، امکان ایجاد چندگانگی فضایی بیشتر و همچنین قابلیت ایجاد پرتو با دقت بالاتر فراهم می‌شود. برای بررسی بار محاسباتی الگوریتم پیشنهادی در روش [۲۲]، متوسط زمان اجرای برنامه برای دو الگوریتم محاسبه و در جدول ۱ نشان داده شده است. طبق نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که هرچه تعداد آنتن‌ها افزایش می‌یابد، بار محاسباتی نیز افزایش پیدا می‌کند. تعداد دفعات تکرار جهت محاسبه میانگین زمان اجرای برنامه ۵۰ مرتبه و  $P_{\max} = 10\text{dB}$  در نظر گرفته شده است. RAM سیستم مورد نظر ۱۶ GB بوده و CPU سیستم مورد نظر CORE i۷ با فرکانس ۲٫۷ GHz می‌باشد. با افزایش تعداد آنتن، تعداد درجات آزادی برای حل مسئله بیشتر شده و در نتیجه عملکرد سیستم (شکل ۸ و ۹) نیز بهتر می‌شود. از طرفی با افزایش تعداد آنتن، بار محاسباتی الگوریتم نیز بیشتر می‌شود و بنابراین مصالحه‌ای میان عملکرد سیستم و بار محاسباتی الگوریتم برقرار می‌گردد. همچنین مجموعه قید حاصل در مسئله بهینه‌سازی برای  $P_{\max}$  بیشتر، زیرمجموعه قید در حالت  $P_{\max}$  کمتر بوده و در نتیجه، مجموع نرخ حاصل نیز بزرگ‌تر یا مساوی نرخ حاصل در حالت  $P_{\max}$  کمتر است و همان طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله و به اشباع رفتن برداشتر، افزایش  $P_{\max}$  منجر به افزایش نرخ می‌شود. از طرفی، ماکسیمم توان ارسالی به بودجه توان فرستنده و میزان تداخل قابل تحمل ایجادشده توسط آن بر کانال‌های مجاور بستگی دارد.

- IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 11, pp. 9420-9424, Nov. 2016.
- [23] M. Maleki, A. M. D. Hoseini, and M. Masjedi, "Performance analysis of SWIPT relay systems over Nakagami-m fading channels with non-linear energy harvester and hybrid protocol," in *Proc. Iranian Conf. on Electrical Engineering, ICEE'18*, pp. 610-615, Mashhad, Iran, 8-10 May 2018.
- [24] S. Pejovski, Z. Hadzi-Velkov, and R. Schober, "Optimal power and time allocation for WPCNs with piece-wise linear EH model," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 364-367, Jun. 2017.
- [25] E. Boshkovska, D. W. K. Ng, N. Zlatanov, and R. Schober, "Practical non-linear energy harvesting model and resource allocation for SWIPT systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2082-2085, Dec. 2015.
- [26] Y. Dong, M. J. Hossain, and J. Cheng, "Performance of wireless powered amplify and forward relaying over Nakagami-m fading channels with nonlinear energy harvester," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 672-675, Apr. 2016.
- [27] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, 2004.
- [28] M. Grant and S. Boyd, *CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming, Version 2.1*, 2014.
- [9] S. Leng, D. W. K. Ng, N. Zlatanov, and R. Schober, "Multi-objective beamforming for energy-efficient SWIPT systems," in *Proc. Int. Conf. on Computing, Networking and Communications, ICNC'16*, 7 pp., Kauai, HI, USA, 15-18 Feb. 2016.
- [10] H. Lee, K. J. Lee, H. Kim, B. Clerckx, and I. Lee, "Resource allocation techniques for wireless powered communication networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications, ICC'16*, 6 pp., Kuala Lumpur, Malaysia, 22-27 May 2016.
- [11] D. K. P. Asiedu, H. Lee, and K. J. Lee, "Transmit power minimization for a multi-hop SWIPT decode-and-forward sensor network," in *Proc. IEEE 90th Vehicular Technology Conf., VTC'19*, 5 pp., Honolulu, HI, USA, 22-25 Sept. 2019.
- [12] H. Ju and R. Zhang, "Throughput maximization in wireless powered communication networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 418-428, Jan. 2013.
- [13] L. Liu, R. Zhang, and K. C. Chua, "Multi-antenna wireless powered communication with energy beamforming," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 62, no. 12, pp. 4349-4361, Dec. 2014.
- [14] X. Kang, C. K. Ho, and S. Sun, "Full-duplex wireless-powered communication network with energy causality," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 14, no. 10, pp. 5539-5551, Oct. 2015.
- [15] H. Ju and R. Zhang, "Optimal resource allocation in full-duplex wireless-powered communication network," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 62, no. 10, pp. 3528-3540, Oct. 2014.
- [16] Z. Hadzi-Velkov, I. Nikoloska, G. K. Karagiannidis, and T. Q. Duong, "Wireless networks with energy harvesting and power transfer: joint power and time allocation," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 23, no. 1, pp. 50-54, Jan. 2015.
- [17] F. Zhao, L. Wei, and H. Chen, "Optimal time allocation for wireless information and power transfer in wireless powered communication systems," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 3, pp. 1830-1835, Mar. 2015.
- [18] E. Boshkovska, D. W. K. Ng, N. Zlatanov, A. Koelpin, and R. Schober, "Robust resource allocation for MIMO wireless powered communication networks based on a non-linear EH model," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 65, no. 5, pp. 1984-1999, May 2017.
- [19] D. K. P. Asiedu, S. Mahama, C. Song, D. Kim, and K. J. Lee, "Beamforming and resource allocation for multiuser full-duplex wireless-powered communications in IoT networks," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 7, no. 12, pp. 11355-11370, Dec. 2020.
- [20] I. Hameed, P. V. Tuan, M. R. Camana, and I. Koo, "Optimal energy beamforming to minimize transmit power in a multi-antenna wireless powered communication network," *Electronics*, vol. 10, no. 4, pp. 2079-9292, 2021.
- [21] P. Ramezani and A. Jamalipour, "Two-way dual-hop WPCN with a practical energy harvesting model," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 7, pp. 8013-8017, Jul. 2020.
- [22] H. Lee, K. J. Lee, H. B. Kong, and I. Lee, "Sum-rate maximization for multiuser MIMO wireless powered communication networks,"

**مهرنوش میرحاج** در سال ۱۳۹۵ مدرک کارشناسی مهندسی برق بیوالکترونیک را از دانشگاه پیام نور اصفهان و در سال ۱۳۹۹ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات خود را از موسسه آموزش عالی صفاهان دریافت نمود. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده عبارتند از: مخابرات چندرودی چندخروجی، مخابرات‌های مبتنی بر برداشتهای انرژی.

**مریم مسجدی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی مخابرات و کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات سیستم به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۰ در دانشگاه صنعتی اصفهان و در مقطع دکتری مهندسی برق در سال ۱۳۹۵ و در همان دانشگاه به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش سیگنال در سیستم‌های مخابراتی، مخابرات بی‌سیم و سیستم‌های رادار.

**محمدفرزان صباحی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی الکترونیک و کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۷۹ در دانشگاه صنعتی اصفهان و در مقطع دکتری مهندسی برق در سال ۱۳۸۶ و در همان دانشگاه به پایان رسانده است. ایشان از سال ۱۳۸۷ در دانشگاه اصفهان مشغول به فعالیت گردید و هم‌اکنون دانشیار دانشکده فنی مهندسی این دانشگاه می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش سیگنال‌های آماری، تئوری مخابرات و رادار.