

راه حل‌های برخط بهینه مجانبی برای شبکه‌های مخابراتی جاذب انرژی

محمود محصل فقهی و علی‌اعظم عباسفر

جو، به یکی از دلایل اصلی تغییرات اقلیم و گرمایش کره زمین مبدل خواهد شد.

جاذب‌های انرژی، انرژی را از محیط یا منابع دیگر (مانند گرمای بدن) دریافت کرده و آن را به انرژی الکتریکی قابل استفاده تبدیل می‌کنند. از جمله وسیله‌های متداول جاذب انرژی که به جذب انرژی از محیط می‌پردازند می‌توان به سلول‌های خورشیدی، جذب‌کننده‌های ارتعاش، آسیاب‌های آبی، توربین‌های بادی، سلول‌های سوخت میکروبی، مولدهای ترموالکتریک و سلول‌های پیزوالکتریک اشاره نمود. از میان موارد مذکور، جذب کردن انرژی خورشیدی از طریق اثر فوتولتاییک^۵ اغلب به عنوان فناوری به کار رفته در بسیاری از گرہ‌های حسگر شناخته می‌شود. بر خلاف گرہ‌های حسگری که بر اساس باتری کار می‌کنند، گرہ‌های جاذب انرژی به صورت بالقوه به انرژی نامحدود دسترسی دارند اما منابع انرژی و وسیله جاذب انرژی ممکن است طوری باشد که انرژی نتواند در همه زمان‌ها تولید شود (مثل سلول خورشیدی). علاوه بر این نرخ تولید انرژی ممکن است محدود باشد، لذا نحوه مصرف انرژی باید به گونه‌ای باشد که گرہ بتواند برای مدت طولانی عملکرد مطلوبی داشته باشد.

شبکه‌های مخابراتی سبز مبتنی بر EH اخیراً توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود معطوف کرده‌اند. پژوهش‌های اولیه در مورد جذب انرژی در شبکه‌های حسگری در [۳] تا [۵] ارائه شدند. در [۶] ظرفیت شانسون^۶ گرہ حسگر جاذب انرژی که روی کانال نویز گوسی سفید جمع‌پذیر^۷ (AWGN) به ارسال اطلاعات می‌پردازد، مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اثر بافر انرژی و نیز عدم کارایی در ذخیره‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه مشابه با [۶] در [۷] برای یک مدل خاص انجام شده که از روش متفاوتی برای اثبات نتیجه به دست آمده بهره گرفته است. نتیجه مهم ارائه‌شده در [۷] این است که ظرفیت کانال AWGN با ورود تصادفی انرژی (جذب انرژی) مساوی است با ظرفیت کانال AWGN با فید توان متوسط برابر با متوسط نرخ شارژ مجدد.

مسئله نوبت‌بندی^۸ بهینه بسته^۹ در سامانه مخابراتی بی‌سیم تک‌کاربره جاذب انرژی که بسته‌های داده و انرژی جذب‌شده به صورت تصادفی وارد گرہ منبع می‌شوند در [۸] مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله نرخ ارسال با توجه به بار ترافیکی و انرژی موجود به صورت وقتی تغییر می‌کند تا این که زمان مورد نیاز برای ارسال بسته‌ها حداقل شود. فرض شده که لحظات جذب انرژی و مقادیر جذب‌شده، قبل از آغاز ارسال معلوم باشد و در نتیجه خط مشی نوبت‌بندی بهینه برون خط^{۱۰} که زمان ارسال

چکیده: جذب انرژی یک راه حل نوین برای محدودیت همیشگی شبکه‌های بی‌سیم که همان محدودیت انرژی است، می‌باشد. گرہ‌های جاذب انرژی با دسترسی به منابع نامحدود انرژی، برای افزایش طول عمر شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم به کار گرفته می‌شوند. در این قالب، اخیراً جذب انرژی به عنوان یک روش نویندهنده برای مخابرات سبز ظهور کرده است. در این مقاله، تخصیص برخط منابع که به طور مجانبی بهینه می‌باشد برای دسته وسیعی از توابع فایده در شبکه‌های مخابراتی EH ارائه شده است. نشان داده شده که جواب با در نظر گرفتن الگوی متوسط تولید EH و مستقل از دینامیک تصادفی آن حاصل می‌شود. جواب به دست آمده نه دارای پیچیدگی راه حل‌های برخط همچون برنامه‌ریزی پویا است و نه از دانش غیر علی در مورد الگوی EH بهره می‌برد. علاوه بر این چندین مثال عملی برای توابع فایده و هزینه به کار رفته در سامانه‌های مخابراتی در نظر گرفته شده و نتیجه کلی به دست آمده برای آنها ارائه خواهد شد. همچنین با شبیه‌سازی‌های عددی به بررسی و راستی‌آزمایی نتایج تحلیلی خواهیم پرداخت. نتایج شبیه‌سازی دستاوردهای تحلیلی ارائه‌شده در این مقاله را تأیید کرده و میزان دقت منحنی‌های تحلیلی مجانبی را برای بازه‌های ارسال به کار رفته در عمل نشان می‌دهند.

کلیدواژه: تخصیص منابع، جذب انرژی، راه حل برخط، رفتار مجانبی، مخابرات سبز.

۱- مقدمه

جذب انرژی (EH)^۱ به عنوان یک راه حل نوین بخش برای محدودیت انرژی شبکه‌های بی‌سیم همچون شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN)^۲ و شبکه‌های اقتضایی^۳ که دارای منابع ذخیره‌سازی انرژی محدود می‌باشند، اخیراً مورد توجه قرار گرفته است [۱].

مشکل اصلی گرہ‌ها در شبکه‌های فوق این است که جایگزینی باتری‌های خالی‌شده، بالاخص در محیط‌های متخاصم یا آسیب‌رسان، بسیار پرهزینه یا غیر ممکن است. همچنین EH به عنوان اساس شبکه‌های مخابرات سبز^۴ به منظور کاهش مصرف روزافزون انرژی در فعالیت‌های بشری معرفی شده است [۲]. این نکته وقتی بیشتر حایز اهمیت می‌شود که بدانیم به زودی مصرف روزافزون انرژی در شبکه‌های پرمقاصی و همه‌جا حاضر بی‌سیم، با افزودن بر میزان گازهای گلخانه‌ای

این مقاله در تاریخ ۱۳ آبان ماه ۱۳۹۳ دریافت و در تاریخ ۸ تیر ماه ۱۳۹۴ بازنگری شد.

محمود محصل فقهی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، (email: mohasselfeghi@ut.ac.ir).

علی‌اعظم عباسفر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، (email: abbasfar@ut.ac.ir).

5. Photovoltaic Effect
6. Shannon
7. Additive White Gaussian Noise
8. Scheduling
9. Packet
10. Offline

1. Energy Harvesting
2. Wireless Sensor Network
3. Ad-hoc
4. Green Communications

را برای آنها استخراج خواهیم کرد. در ادامه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی ارائه خواهد شد که نتایج تحلیلی را تأیید خواهند کرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تنها زمان متناظر با ۱۰۰ لحظه جذب انرژی برای استفاده از نتایج مجانبی به طور تقریبی کافی خواهد بود.

۲- مدل سامانه

یک سامانه مخابراتی نقطه به نقطه را که در آن فرستنده قادر است از محیط انرژی جذب نماید و از آن به عنوان تنها منبع انرژی برای مخابره اطلاعات استفاده نماید، در نظر بگیرید. مدل سامانه در شکل ۱ نشان داده شده است. وسیله جذب‌کننده انرژی مقادیر تصادفی انرژی محیطی را جذب کرده و در اختیار واحد مدیریت انرژی موجود در فرستنده می‌گذارد. این واحد در هر لحظه بین استفاده از انرژی جذب‌شده برای ارسال اطلاعات و ذخیره‌سازی آن در واحد ذخیره‌سازی انرژی (باتری یا خازن) برای استفاده آتی، تصمیم‌گیری می‌کند. شیار زمانی بین دو لحظه متوالی جذب انرژی که دارای طول Δt است، یک ایپاک^{۱۵} نامیده شده است. با فرض معلوم‌بودن لحظات جذب انرژی (یا به طور معادل نمونه‌برداری از مجموع انرژی جذب‌شده در بازه‌های با اندازه از پیش تعیین شده)، تنها بخش تصادفی الگوی EH مقادیر جذب‌شده در شروع هر ایپاک، یعنی $\mathcal{S}_1 = \{E_i, i = 0, \dots, M-1\}$ برای دوره ارسال محدود $T = M\Delta t$ می‌باشد. فرض کرده‌ایم که ظرفیت وسیله ذخیره‌سازی انرژی به اندازه کافی بزرگ‌تر از متوسط نرخ EH باشد، یعنی $B_{\max} \geq \bar{E}$ (با توجه به مقادیر کوچک انرژی جذب‌شده از محیط، این فرض با شرایط عملی سازگار است). با تعریف $S_i = \sum_{n=0}^i E_n$ به عنوان مجموع انرژی جذب‌شده تا i امین لحظه جذب انرژی، واضح است که مجموعه جدید $\mathcal{S}_1 = \{S_i, i = 0, \dots, M-1\}$ معادل خطی مجموعه \mathcal{S}_1 می‌باشد. لذا هر تابع فایده که بر اساس $\{E_i, i = 0, \dots, M-1\}$ بیان شده باشد، قابل بیان به صورت تابعی از $\{S_i, i = 0, \dots, M-1\}$ خواهد بود. در ادامه به معرفی یک طرح برخط نوین با پیچیدگی بسیار کمتر نسبت به طرح‌های دیگر از جمله برنامه‌ریزی پویا [۱۴] خواهیم پرداخت که به صورت مجانبی (برای مدت زمان‌های ارسال به اندازه کافی بزرگ) بهینه می‌باشد.

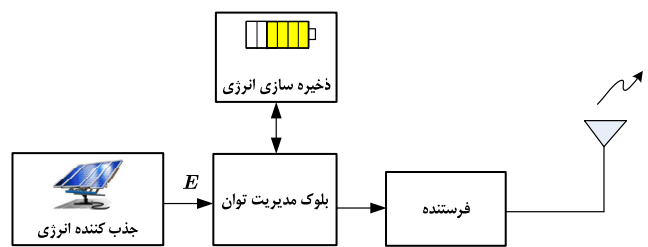
۳- فرمول‌بندی مسأله و حل بهینه آن

مسأله حل بهینه مجانبی برای شبکه‌های مخابراتی EH با تابع فایده (هزینه) کلی را که متوسط توابع فایده (هزینه) تعریف شده برای هر ایپاک است، در نظر بگیرید. به عنوان چند نمونه از توابع فوق می‌توان به متوسط نرخ ارسال در ایپاک‌های مختلف، متوسط احتمال عدم وجود انرژی کافی برای ارسال با نرخ ثابت از پیش تعیین شده و متوسط SNR سیگنال‌های ارسالی در ایپاک‌های مختلف اشاره نمود. مسأله برای تابع فایده $f^U(\cdot)$ به صورت بیشینه‌سازی زیر است

$$P1: \max_{p_i \geq 0} \int_M^U(\{p_i\}) = \max_{p_i \geq 0} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g^u(p_i) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } p_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, M \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^l p_i \leq \sum_{i=1}^{l-1} E_i, \quad l = 1, \dots, M \quad (3)$$



شکل ۱: مدل سامانه.

بسته‌ها را حداقل می‌سازد، تحت قیدهای علی‌بودن داده (داده‌ها قبل از دریافت نمی‌توانند ارسال شوند) و نیز علی‌بودن ورود انرژی (انرژی قبل از جذب شدن نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد) ارائه شده است. مطالعه انجام‌شده در [۸] سپس به کانال پخش^۱ [۹] و [۱۰]، دسترسی چندگانه^۲ [۱۱]، تداخلی^۳ [۱۲]، دوپرسی^۴ [۱۳] و محوشدگی^۵ [۱۴] تممیم داده شده است.

راه حل‌های بهینه برخط^۶ برای مسایل تخصیص توان در سامانه‌های مخابراتی EH که تنها نیازمند دانش علی در مورد پروفایل جذب انرژی هستند، دارای قابلیت پیاده‌سازی عملی می‌باشند اما عمدتاً شامل برنامه‌ریزی پویا^۷ [۱۴] بوده و دارای پیچیدگی و بار محاسباتی بسیار زیاد حتی برای کانال‌های ساده نقطه به نقطه^۸ می‌باشند. از طرف دیگر راه حل‌های برون خط اگرچه دارای بار محاسباتی کمتر هستند اما به دلیل نیاز به دانش غیر علی^۹ در مورد پروفایل جذب انرژی، از نظر عملی قابل پیاده‌سازی نیستند.

در این پژوهش با در نظر گرفتن محدوده وسیعی از توابع فایده^{۱۰} (هزینه) به بررسی نحوه تخصیص برخط منابع که به طور مجانبی بهینه هستند، خواهیم پرداخت. توابع فایده (هزینه) تنها بایستی بر حسب مجموع انرژی جذب‌شده به صورت افزایشی (کاهشی) یکنوا باشند و نیازی به برآورده‌سازی خواص دیگری همچون تحدب^{۱۱}، ایستانی^{۱۲} و ارگودیک‌بودن^{۱۳} ندارند. راه حل برخط پیشنهادی برای مسأله تخصیص بهینه منابع در شبکه‌های مخابراتی EH نه دارای پیچیدگی راه حل‌های برخط متداول ارائه‌شده در مراجع که از برنامه‌ریزی پویا بهره می‌برند است و نه همانند راه حل‌های برون خط به طور غیر عملی از دانش غیر علی در مورد الگوی^{۱۴} جذب انرژی سود می‌برد. نشان خواهیم داد که راه حل بهینه مجانبی برای مسأله تخصیص توان در شبکه‌های مخابراتی مبتنی بر جذب انرژی تنها نیازمند دانستن متوسط پروفایل جذب انرژی است و نیازی به دانستن تغییرات تصادفی جذب انرژی ندارد. همچنین چندین مثال برای توابع فایده و هزینه در نظر گرفته و نتایج تحلیلی بهینه مجانبی

1. Broadcast
2. Multiple Access
3. Interference
4. Two Hop
5. Fading
6. Online
7. Dynamic Programming
8. Point to Point
9. Non Causal
10. Utility
11. Convexity
12. Stationarity
13. Ergodicity
14. Pattern

که در آن $\bar{E} = \mathbb{E}\{E_i\}$.

اثبات: ابتدا تابع فایده در مسأله P۱ را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم

$$f_M^U(\{p_i\}) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{\sqrt{M}} g^u(p_i) + \frac{1}{M} \sum_{i=\sqrt{M}+1}^M g^u(p_i) \quad (۹)$$

با توجه به کران‌دار بودن تابع $g^u(\cdot)$ با میل کردن M به سمت بی‌نهایت داریم

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^{\sqrt{M}} g^u(p_i) \leq \frac{\sqrt{M}}{M} G_u \xrightarrow{M \rightarrow \infty} \cdot \quad (۱۰)$$

که در آن کران G_u تابع $g^u(\cdot)$ می‌باشد. در نتیجه برای M های به اندازه کافی بزرگ مسأله P۱ به صورت زیر درمی‌آید

$$P1: \max_{p_i \geq 0} \frac{1}{M} \sum_{i=\sqrt{M}+1}^M g^u(p_i) \quad (۱۱)$$

$$\text{s.t. } p_i \geq 0, \quad i = \sqrt{M} + 1, \dots, M \quad (۱۲)$$

$$\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l l_i p_i \leq \frac{1}{l} \sum_{i=1}^{l-1} E_i, \quad l = \sqrt{M} + 1, \dots, M \quad (۱۳)$$

لذا تخصیص توان در \sqrt{M} ایپاک اول تأثیری در عملکرد مجانبی ندارد و می‌تواند به صورت دلخواه صورت پذیرد (از جمله $p_i = 0, \forall i \leq \sqrt{M}$). حال تعریف می‌کنیم

$$\mathcal{E}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} E_i \quad (۱۴)$$

مقادیر متوسط و واریانس تابع تعریف‌شده فوق به ترتیب به صورت

$$\bar{\mathcal{E}}_n = \mathbb{E}\{\mathcal{E}_n\} = \bar{E} \quad (۱۵)$$

و

$$\sigma_{\mathcal{E}}^2(n) = \mathbb{E}\{|\mathcal{E}_n - \bar{\mathcal{E}}_n|^2\} = \frac{1}{n} \sigma_E^2 \quad (۱۶)$$

در می‌آید که در آن $\sigma_E^2 = \mathbb{E}_{E_i}\{|E_i - \bar{E}|^2\}$.

برای مقادیر بزرگ n با توجه به قضیه حد مرکزی (CLT) \mathcal{E}_n قابل تقریب‌زدن با توزیع نرمال خواهد بود. در نتیجه برای مقادیر بزرگ M و برای $n = \sqrt{M} + 1, \dots, M$ (۱۷) را داریم که در آن نامساوی (a) با توجه به تعریف تابع $Q(\cdot)$ و نامساوی (b) با بهره‌گیری از کران چرنف^۲ برای تابع $Q(\cdot)$ ($Q(x) \leq 0.5e^{-x^2/4}, x > 0$) برقرارند.

همچنین برای توزیع‌های کران‌دار می‌توان از نامساوی هوفدینگ^۳ [۱۵] برای اثبات قضیه استفاده کرد. این قضیه در بخش ۲ پیوست آمده است

$$\Pr\{|\mathcal{E}_n - \bar{E}| \geq \zeta\} = \Pr\{|\mathcal{E}_n - \bar{\mathcal{E}}_n| \geq \zeta\} \stackrel{(a)}{\cong} 2Q\left(\frac{\zeta}{\sigma_{\mathcal{E}}(n)}\right) \stackrel{(b)}{\leq} e^{-\frac{\zeta^2}{2\sigma_{\mathcal{E}}^2(n)}} = (e^{-\frac{\zeta^2}{2\sigma_E^2}})^n = a^n(\zeta) \quad (۱۷)$$

در عمل، انرژی‌های جذب‌شده در هر لحظه زمانی محدود است (یعنی $0 \leq E_i \leq E_{\max}, \forall i$) و در نتیجه بر اساس قضیه ۲ در بخش ۲ پیوست داریم

که در آن $g^u(p_i)$ یک تابع دلخواه افزایشی یکنوا بر حسب p_i است که برای هر ایپاک تعریف می‌شود و l_i طول ایپاک i ام است. رابطه (۲) بیانگر این است که توان‌های تخصیص‌یافته (p_i) بایستی غیر منفی باشند و (۳) بیانگر علی بودن انرژی است، یعنی انرژی قبل از جذب شدن از محیط نمی‌تواند برای ارسال اطلاعات مورد استفاده قرار گیرد. در نتیجه مجموع انرژی مصرف‌شده در هر لحظه نباید بیشتر از مجموع انرژی جذب‌شده از محیط شود.

برای تابع هزینه $f_C(\cdot)$ مسأله به صورت کمینه‌سازی زیر خواهد بود

$$P2: \min_{p_i \geq 0} f_M^C(\{p_i\}) = \min_{p_i \geq 0} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g^c(p_i) \quad (۴)$$

$$\text{s.t. } p_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, M \quad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^l l_i p_i \leq \sum_{i=1}^{l-1} E_i, \quad l = 1, \dots, M \quad (۶)$$

که در آن $g^c(p_i)$ یک تابع دلخواه کاهشی یکنوا بر حسب p_i است که برای هر ایپاک تعریف می‌شود.

هدف یافتن راه حل‌های برخط (در هر لحظه تنها انرژی‌های جذب‌شده تا آن لحظه معلوم است) بهینه به صورت مجانبی برای مسایل فوق‌الذکر است در حالی که زمان ارسال $T = M\Delta t$ (یا به طور معادل M) به سمت بی‌نهایت میل می‌کند.

لم ۱: در مسایل پیشینه‌سازی EH، هر تابع فایده که بر حسب توان‌های تخصیص‌یافته بهینه، p_i^* ، افزایشی باشد بر حسب \mathcal{E}_n نیز افزایشی خواهد بود و به طور مشابه در مسایل کمینه‌سازی EH هر تابع هزینه که بر حسب p_i^* کاهشی باشد بر حسب \mathcal{E}_n نیز کاهشی خواهد بود.

اثبات: با افزایش S_i ها ناحیه مجاز مسایل بهینه‌سازی فوق افزایش می‌یابد و برای P۱ مقدار بهینه تابع فایده افزایش می‌یابد. برای تابع فایده که افزایشی یکنوا است، این معادل مقادیر بزرگ‌تر برای توان‌های تخصیص‌یافته بهینه (p_i^*) است. به طور مشابه برای دسته مسایل P۲، مقدار بهینه تابع هزینه با افزایش S_i ها کاهش می‌یابد که مجدداً منجر به مقادیر بزرگ‌تر توان‌های تخصیص‌یافته بهینه برای تابع هزینه کاهشی یکنوا می‌شود. لذا جواب بهینه مسایل EH رفتار مشابهی نسبت به توان‌های تخصیص‌یافته بهینه و نیز مجموع انرژی‌های جذب‌شده دارد. به عبارت دیگر هر تابع فایده یا هزینه‌ای که بر حسب p_i^* افزایشی (کاهشی) یکنوا باشد، بر حسب S_i ها نیز افزایشی (کاهشی) یکنوا خواهد بود.

اکنون نتیجه اصلی در قالب قضیه زیر مطرح و اثبات می‌شود.
قضیه ۱: برای هر تابع کران‌دار و افزایشی یکنوا از مقادیر انرژی جذب‌شده، تخصیص توان برخط بهینه به صورت مجانبی برای مسایل EH تعریف‌شده به صورت زیر

$$\max_{p_i \geq 0} f_M^U(\{p_i\}) = \max_{p_i \geq 0} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g^u(p_i) \quad (۷)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l l_i p_i \leq \frac{S_l}{l}, \quad l = 1, \dots, M$$

$$p_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, M$$

تنها با در نظر گرفتن الگوی جذب متوسط قابل حصول است. به عبارت دیگر اگر $g^u(\cdot)$ بر حسب توان‌های تخصیص‌یافته یا به طور معادل بر حسب انرژی‌های جذب‌شده افزایشی یکنوا باشد آن گاه

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \max_{p_i \geq 0} f_M^U(\{p_i\}) = h(\bar{E}) \quad (۸)$$

1. Central Limit Theorem
2. Chernoff Bound
3. Hoeffding

است. به عبارت دیگر وقتی $M \rightarrow \infty$ احتمال مشارکت بقیه الگوها در تابع هزینه یا فایده به سمت صفر میل می‌کند و لذا اثر آنها بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن خواهد بود.

۴- ارائه چند مثال عملی

در این بخش دو مثال برای تابع فایده و یک مثال برای تابع هزینه در نظر گرفته و نتایج تحلیلی کلی به دست آمده را برای آنها ارائه می‌کنیم. در بخش بعدی نتایج شبیه‌سازی‌ها با نتایج تحلیلی ارائه‌شده در این بخش مقایسه خواهند شد.

۴-۱ مسأله کمینه‌سازی احتمال کسری انرژی (ESP)

در سامانه‌های مخابراتی با گره‌های EH و با نرخ ارسال ثابت

از جمله انگیزه‌های ارسال با نرخ ثابت می‌توان به محدودیت‌های کیفیت سرویس (نرخ ارسال نباید کمتر از مقدار مشخصی باشد)، عدم دسترسی به اطلاعات حالت کانال برای استفاده از دمولاسیون و کدبندی و فقی و نیز سادگی فرستنده‌های با نرخ ارسال ثابت اشاره نمود. فرستنده EH مقید به ارسال اطلاعات با نرخ ثابت، در صورت داشتن انرژی با نرخ ثابت R به ارسال اطلاعات می‌پردازد تا زمانی که باتری از انرژی تخلیه شود. سپس منتظر لحظه بعدی جذب انرژی می‌ماند تا بتواند به ارسال ادامه دهد (عدم ارسال در صورت نبود انرژی کافی برای ارسال با نرخ ثابت R یا به طور معادل ارسال با نرخ صفر). برای ارزیابی عملکرد چنین سامانه‌ای می‌توان از احتمال کسری انرژی^۲ (ESP) استفاده کرد که به صورت احتمال عدم ارسال به دلیل کمبود انرژی تعریف می‌شود. در چنین شرایطی محاسبه بیشینه نرخ ثابت با حداقل مقدار احتمال کسری انرژی از لحاظ عملی می‌تواند حایز اهمیت باشد. احتمال کسری انرژی به صورت زیر بیان می‌شود

$$P_{es}(R, M) = \mathbb{E}_{\{E_i\}} \left[\max_{n=1, \dots, M} \frac{n}{M} \left(1 - \frac{S_{n-1}}{ng(R)\Delta t} \right) \right]^+ \quad (24)$$

که در آن $p = g(R)$ رابطه نرخ-توان دلخواه یکنوا است و داریم $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ و نحوه محاسبه این رابطه در بخش ۲ پیوست آمده است.

بر اساس قضیه ۱، مقدار مجانبی ESP که به شکل زیر تعریف می‌شود

$$\tilde{P}_{es}(R) = \lim_{M \rightarrow \infty} \left\{ \mathbb{E}_{\{E_i\}} \left[\max_{n=1, \dots, M} \frac{n}{M} \left(1 - \frac{S_{n-1}}{ng(R)\Delta t} \right) \right]^+ \right\} \quad (25)$$

به صورت شکل بسته زیر داده می‌شود

$$\tilde{P}_{es}(R) = \lim_{M \rightarrow \infty} P_{es}(R, M) = \begin{cases} 1 - \frac{\bar{P}}{g(R)}, & \text{if } R > R_c \\ 0, & \text{o.w.} \end{cases} \quad (26)$$

که در آن $\bar{P} = \bar{E}/\Delta t$ و R_c جواب معادله $g(R_c) = \bar{E}/\Delta t$ می‌باشد. به عبارت دیگر فرستنده EH با نرخ ثابت برای کمینه‌سازی احتمال کسری انرژی باید نرخ ارسالش را با توجه به ESP مجاز بر اساس (۲۶) انتخاب نماید. بدیهی است برای نرخ‌های ارسال کمتر از R_c ، ESP صفر خواهد بود.

$$\Pr\{(\mathcal{E}_n - \bar{E}) \geq \zeta\} \leq (e^{-\frac{\zeta^2}{E_{\max}^2}})^n \quad (18)$$

واضح است که $a = e^{-\zeta^2/E_{\max}^2} < 1$.

حال کران اجتماع به صورت (۱۹) محاسبه می‌شود

$$\Pr\left\{ \bigcup_{n=\sqrt{M+1}}^M (|\mathcal{E}_n - \bar{E}_n| \geq \zeta) \right\} \leq \sum_{n=\sqrt{M+1}}^M \Pr\{|\mathcal{E}_n - \bar{E}_n| \geq \zeta\} \leq \sum_{n=\sqrt{M+1}}^M a^n \leq \sum_{n=\sqrt{M+1}}^{\infty} a^n = \frac{a^{\sqrt{M+1}}}{1-a} = \Theta(M) \quad (19)$$

حال اگر M به سمت بی‌نهایت میل کند، آن گاه با توجه به این که $a < 1$ ، داریم $\Theta(M) \rightarrow 0$. لذا با احتمال یک، رابطه زیر برقرار است

$$\bar{E} - \zeta \leq \mathcal{E}_n \leq \bar{E} + \zeta, \quad \forall n \geq \sqrt{M+1} \quad (20)$$

اکنون دو مسأله زیر را مد نظر قرار دهید

$$P\gamma: \max_{p_i \geq 0} f_M^U(\{p_i\}) = \max_{p_i \geq 0} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g^u(p_i) \quad (21)$$

$$\text{s.t. } (2), \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l l_i p_i \leq \bar{E} - \zeta, \quad l = 1, \dots, M$$

و

$$P\gamma'': \max_{p_i \geq 0} f_M^U(\{p_i\}) = \max_{p_i \geq 0} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g^u(p_i) \quad (22)$$

$$\text{s.t. } (2), \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l l_i p_i \leq \bar{E} + \zeta, \quad l = 1, \dots, M$$

فرض کنید جواب‌های بهینه دو مسأله فوق به ترتیب برابر با A' و A'' باشند. با توجه به (۲۰) و این که $g^u(\cdot)$ تابع پیوسته یکنوا روی توان‌های تخصیص یافته (و طبق لم ۱ تابع یکنوا روی انرژی‌های جذب شده از محیط) می‌باشد، نتیجه می‌گیریم جواب بهینه مجانبی برای مسأله $P\gamma$ (طبق تعریف برابر با A) در رابطه $A' \leq A \leq A''$ صدق می‌کند.

حال با میل دادن $\zeta \rightarrow 0$ دو مسأله $P\gamma'$ و $P\gamma''$ به مسأله زیر تبدیل می‌شوند

$$\max_{p_i \geq 0} f_M^U(\{p_i\}) = \max_{p_i \geq 0} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g^u(p_i) \quad (23)$$

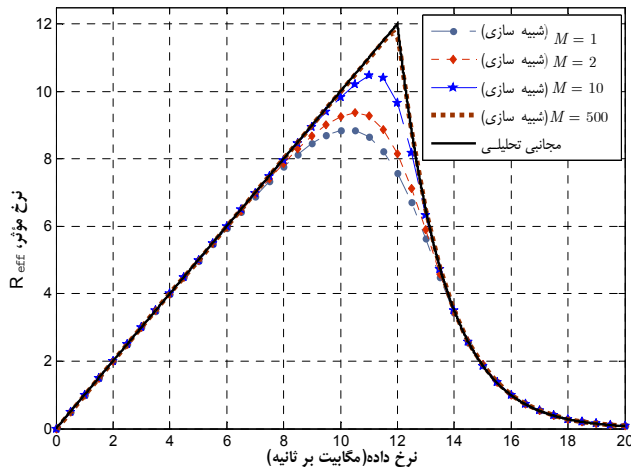
$$\text{s.t. } (2), \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l l_i p_i \leq \bar{E}, \quad l = 1, \dots, M$$

که جواب آن تنها تابعی از \bar{E} خواهد بود (طبق تعریف $(A' = A'' = h(\bar{E}))$ و در نتیجه با کمک قضیه ساندرویج^۱ داریم $A = \lim_{M \rightarrow \infty} \max_{p_i \geq 0} f_M^U(\{p_i\}) = h(\bar{E})$ یعنی جواب بهینه مجانبی برای تابع فایده تنها با در نظر گرفتن الگوی متوسط جذب انرژی به دست می‌آید. بدین ترتیب نتیجه دلخواه حاصل می‌شود و اثبات پایان می‌یابد.

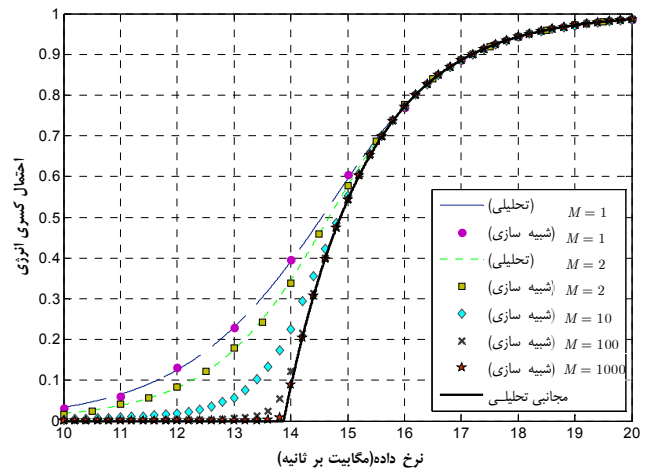
نتیجه فرعی ۱: برای مسأله کمینه‌سازی $P\gamma$ ارائه شده برای تابع هزینه کاهش یکنوا، راه حل برخط مجانبی تنها با در نظر گرفتن الگوی متوسط جذب انرژی حاصل می‌شود.

اثبات: مشابه با اثبات قضیه ۱ می‌توان این نتیجه را به دست آورد که از تکرار آن اجتناب می‌گردد.

نکته (مفهوم شهودی قضیه ۱): به طور شهودی قضیه ۱ بیان می‌دارد که برای مدت زمان ارسال به اندازه کافی بزرگ، الگوی متوسط جذب انرژی سنگین‌وزن‌ترین الگو برای به دست آوردن تابع هزینه یا فایده



شکل ۳: مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف زمان ارسال (M) با مقدار تحلیلی به دست آمده برای مقدار مجانبی نرخ مؤثر.



شکل ۴: مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و مقادیر تحلیلی احتمال کسری انرژی برای مقادیر مختلف زمان ارسال (M).

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج تحلیلی ارائه شده در این مقاله را با چندین مثال عددی مورد بررسی و راستی‌آزمایی قرار خواهیم داد. در شبیه‌سازی‌ها کانال AWGN باند محدود را با چگالی طیف توان $N = 10^{-13}$ وات بر هرتز و پهنای باند $W = 1$ MHz در نظر گرفته‌ایم. فاصله بین فرستنده و گیرنده ۱ کیلومتر و تلفات مسیر $\psi = 70$ dB فرض شده است (مقادیر متداولی که در برخی مراجع EH استفاده شده است به عنوان مثال [۸]).

شکل ۲ اثر مدت زمان ارسال (یا دوره جذب انرژی، یعنی $T = M\Delta t$) را بر روی احتمال کسری انرژی سامانه معرفی شده در مثال ۱ نشان می‌دهد. به طور مشخص، دقت رابطه تحلیلی مجانبی با افزایش M در این شکل مورد تحقیق قرار گرفته است. در این ارتباط، رابطه ESP بر حسب نرخ داده برای نرخ متوسط جذب انرژی ۱۵ میلی‌ژول نشان داده شده است. همچنین رابطه شکل بسته دقیق برای ESP برای $M = 1$ و $M = 2$ نمایش داده شده است. نتایج شبیه‌سازی روابط تحلیلی به دست آمده را تأیید می‌کنند. همان گونه که از این شکل مشخص است، نتایج شبیه‌سازی با افزایش تعداد لحظات جذب انرژی به سمت منحنی ESP مجانبی که به صورت تحلیلی به دست آمده است، میل می‌کند و بدین ترتیب نتیجه تحلیلی توسط شبیه‌سازی مورد تأیید قرار می‌گیرد. همچنین ESP مجانبی یک کران پایین برای ESP ارسال با دوره محدود دلخواه فراهم می‌آورد. این کران پایین برای نرخ‌های داده زیاد (تقریباً بیشتر از ۱۶ مگابیت بر ثانیه) و نیز مقادیر به اندازه کافی بزرگ M محکم است.

شکل ۳ نرخ مؤثر متناظر با ESP ارائه شده در شکل ۲ را بر حسب نرخ داده برای $R_s = 12$ Mbps نشان می‌دهد. همچنین نرخ مؤثر برای ارسال با چندین دوره زمانی محدود در این شکل نشان داده شده است. طراحان فرستنده‌ها علاقه‌مند به دانستن مقدار R برای هر M هستند که مقدار R_{eff} را بیشینه می‌نماید لذا بر اساس این پژوهش، برای هر دوره زمانی محدود، می‌توان اطلاعات مربوط به بیشینه نرخ مؤثر قابل حصول که برای ارسال داده بایستی به کار برده شود را در اختیار طراح سامانه قرار داد. برای مثال در شکل ۳ بیشینه نرخ مؤثر قابل حصول برای $M = 1$ برابر با $R_{eff} = 8,1869$ Mbps می‌باشد که در $R = 10,21$ Mbps رخ می‌دهد. در نتیجه برای $M = 1$ بایستی در صورت وجود انرژی کافی با نرخ ثابت $R = 10,21$ Mbps به ارسال اطلاعات پرداخت. همان گونه که

۴-۲ مسأله بیشینه‌سازی نرخ مؤثر در سامانه‌های مخابراتی با گره‌های EH و با نرخ ارسال ثابت

متناسب با احتمال کسری انرژی برای هر ارسال با دوره محدود M می‌توان نرخ مؤثر ارسال را به صورت زیر تعریف کرد

$$\mathcal{R}_{eff}(R, M) = R(1 - P_{es}(R, M)) \quad (27)$$

در عمل، نرخ واقعی ارسال نرخ مؤثر ارائه شده در (۲۷) است که بایستی بیشینه شود. مسأله بیشینه‌سازی این تابع فایده‌مندی از مسأله بیشینه‌سازی P_1 می‌باشد. بر اساس قضیه ۱، مقدار بهینه مجانبی نرخ مؤثر ارسال در سامانه‌های مخابراتی با گره‌های EH و نرخ ارسال ثابت و با استفاده از رابطه توان-نرخ شانون (یعنی $g(R) = 2^R - 1$) به صورت زیر داده می‌شود

$$\tilde{\mathcal{R}}_{eff} = R(1 - \tilde{P}_{es}(R)) = \begin{cases} \frac{\bar{P}R}{(2^R - 1)}, & \text{if } R > R_c \\ R & \text{o.w.} \end{cases} \quad (28)$$

که در آن $U(\cdot)$ تابع پله واحد می‌باشد. همان گونه که قابل انتظار بود، بیشینه نرخ مؤثر دست‌یافتنی برابر با ظرفیت یعنی $C_{\bar{P}} = R_c$ است.

۴-۳ مسأله بیشینه‌سازی گذردهی

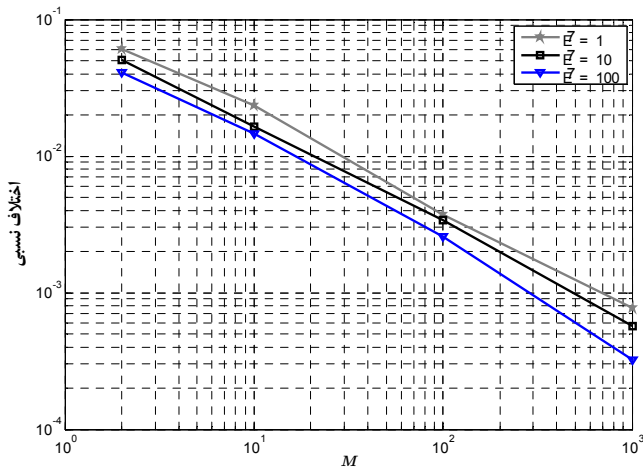
در این مثال، تابع فایده به صورت زیر می‌باشد

$$f(\{p_i\}) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M W \log_2 \left(1 + \frac{p(i)\psi}{N.W} \right) \quad (29)$$

که در واقع متوسط نرخ‌های ارسال در ایپاک‌های مختلف است که در آن از رابطه نرخ-توان شانون برای کانال AWGN باند محدود استفاده شده است. این مسأله نیز مثالی برای مسأله P_1 است. نتیجه قضیه ۱ برای این مثال به صورت زیر قابل ارائه است

$$\tilde{f} = W \log_2(1 + \gamma \bar{E}) \quad (30)$$

که $\gamma = \psi / (N.W\Delta t)$. به عبارت دیگر جواب بهینه تنها بر اساس متوسط نرخ جذب انرژی (\bar{E}) و مستقل از مقادیر تصادفی E_i ها حاصل می‌شود.



شکل ۵: اختلاف نسبی مقادیر شبیه‌سازی و رابطه تحلیلی مجانبی بر حسب M برای سه مقدار متوسط جذب انرژی $\bar{E} = 1, 10, 100$ mJ.

حل‌های برون‌خط نیازمند دانش غیر علی از پروفایل جذب انرژی است و نه همچون روش‌های برخط ارائه‌شده در مراجع دیگر که بر اساس برنامه‌ریزی پویا هستند، دارای پیچیدگی بالا است. همچنین چندین مثال عملی برای توابع فایده و هزینه متداول در سامانه‌های مخابراتی مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه کلی ارائه‌شده به صورت تحلیلی برای آنها نیز ارائه گردید. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، نتایج تحلیلی به دست آمده در این پژوهش مورد راستی‌آزمایی قرار گرفت و نهایتاً تأیید گردید. نشان داده شد که به صورت مجانبی راه حل بهینه برخط تنها متوسط الگوی جذب انرژی را می‌تواند مورد استفاده قرار دهد و دینامیک تصادفی پروفایل جذب در جواب به دست آمده تأثیری نخواهد گذاشت. شبیه‌سازی‌ها نشان دادند تنها بازه زمانی متناظر با ۱۰۰ لحظه جذب انرژی برای استفاده از نتایج مجانبی تحلیلی با دقت مناسب کافی خواهد بود.

پیوست

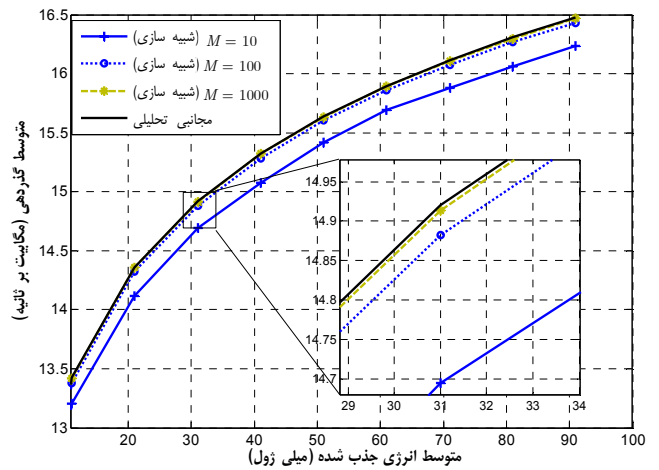
پیوست ۱

قضیه ۲ ([۱۵]، قضیه ۲): اگر X_1, X_2, \dots, X_n مستقل از هم باشند و $\alpha_i \leq X_i \leq \beta_i, (i = 1, \dots, n)$ آن گاه برای $\lambda > 0$ داریم

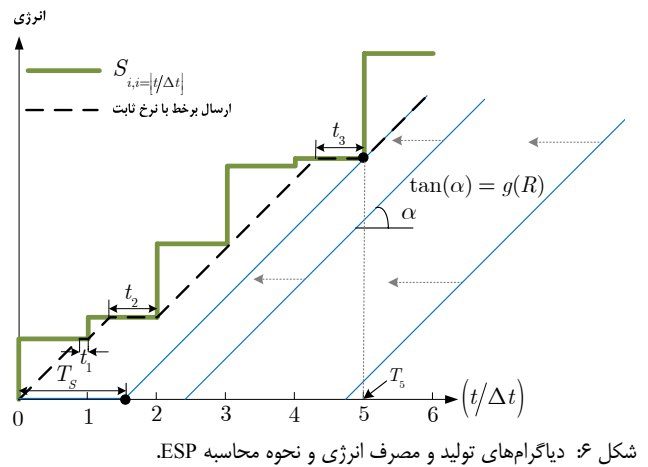
$$\Pr\left\{\frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} - \bar{X} \geq \lambda\right\} \leq e^{-\frac{\lambda^2 n^2}{\sum_{i=1}^n (\beta_i - \alpha_i)^2}} \quad (۱-پ)$$

پیوست ۲

شکل ۶ منحنی مجموع انرژی جذب‌شده در هر لحظه $S_{i,i=[t/\Delta t]} = \sum_{n=1}^{[t/\Delta t]} E_n$ که $[x]$ جزء صحیح x است) و منحنی مصرف انرژی در ارسال با نرخ ثابت R را برای سامانه ارائه‌شده در مثال ۱ نشان می‌دهد. همان طور که می‌دانیم منحنی مصرف انرژی هر ارسال مجاز بایستی زیر منحنی مجموع انرژی جذب‌شده قرار گیرد تا قید علی‌بودن انرژی را برآورده سازد. همان گونه که توضیح داده شد در این سامانه در صورت موجود بودن انرژی، ارسال با نرخ ثابت R انجام می‌شود و در غیر این صورت ارسالی صورت نمی‌گیرد. مدت زمان عدم ارسال به دلیل کمبود انرژی در شکل ۶ به صورت $t_1 + t_2 + t_3$ می‌باشد. با توجه به خاصیت خطوط موازی، منحنی موازی با منحنی ارسال که در لحظه T_0 بر منحنی مجموع انرژی جذب‌شده مماس می‌باشد، مدت زمان عدم ارسال و در نتیجه کسر کمبود انرژی یکسانی با منحنی ارسال دارد، یعنی



شکل ۴: متوسط گذردهی بر حسب متوسط انرژی جذب‌شده برای مقادیر مختلف زمان ارسال (M) و مقایسه آن با مقدار مجانبی محاسبه‌شده به صورت تحلیلی.



شکل ۶: دیاگرام‌های تولید و مصرف انرژی و نحوه محاسبه ESP.

از این شکل مشخص است، بیشینه R_{eff} و مقدار R مرتبط با آن با کاهش M کاهش می‌یابد.

شکل ۴ متوسط گذردهی بر حسب متوسط انرژی جذب‌شده از محیط را برای بازه‌های ارسال محدود نمایش می‌دهد. همچنین منحنی مجانبی محاسبه‌شده به صورت تحلیلی در این شکل برای مقایسه آورده شده است. همانند مثال‌های قبل مشاهده می‌گردد که با افزایش زمان ارسال، منحنی‌های شبیه‌سازی به سمت رابطه مجانبی تحلیلی میل می‌کنند و $M = 100$ تقریب خوبی برای منحنی مجانبی است.

شکل ۵ اختلاف نسبی مقادیر شبیه‌سازی و رابطه تحلیلی مجانبی $(\bar{f} - f/f)$ را بر حسب M برای سه مقدار متوسط جذب انرژی نشان می‌دهد. نتایج ارائه‌شده در این شکل، متوسط ۱۰۰۰ بار اجرای مستقل برنامه است. همان گونه که مشاهده می‌شود برای مقادیر مختلف متوسط جذب انرژی، طرح برخطی که تنها بر اساس متوسط جذب انرژی به ارسال اطلاعات می‌پردازد، نسبت به طرح بهینه دارای خطای کمتر از ۱٪ برای $M \geq 10^2$ خواهد بود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله دسته وسیعی از مسایل که توابع فایده یا هزینه آنها تنها دارای شرط یکنوا افزایشی یا یکنوا کاهش می‌باشند، مورد توجه قرار گرفت. برای این دسته از مسایل، تخصیص بهینه منابع به صورت مجانبی تنها بر اساس دانش علی از شرایط جذب انرژی از محیط اطراف (راه حل برخط) مورد تحقیق قرار گرفت. راه حل برخط ارائه‌شده نه همچون راه

- [9] J. Yang, O. Ozel, and S. Ulukus, "Broadcasting with an energy harvesting rechargeable transmitter," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 2, pp. 571-583, Feb. 2012.
- [10] M. A. Antepi, E. Uysal-Biyikoglu, and H. Erkal, "Optimal packet scheduling on an energy harvesting broadcast link," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, no. 8, pp. 1712-1731, Sep. 2011.
- [11] J. Yang and S. Ulukus, "Optimal packet scheduling in a multiple access channel with energy harvesting transmitters," *J. of Commun. and Net.*, vol. 14, no. 2, pp. 140-150, Apr. 2012.
- [12] K. Tutuncuoglu and A. Yener, "Sum-rate optimal power policies for energy harvesting transmitters in an interference channel," *J. of Commun. and Net.*, vol. 14, no. 2, pp. 151-161, Apr. 2012.
- [13] D. Gunduz and B. Devillers, "Two-hop communication with energy harvesting," in *Proc. of 4th IEEE Int. Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Process, CAMSAP'11*, pp. 201-204, San Juan, Puerto Rico, 13-16 Dec. 2011.
- [14] O. Ozel, K. Tutuncuoglu, J. Yang, S. Ulukus, and A. Yener, "Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: optimal policies," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, no. 8, pp. 1732-1743, Sep. 2011.
- [15] W. Hoeffding, "Probability inequalities for sums of bounded random variables," *J. of the American Statistical Association*, vol. 58, no. 301, pp. 13-30, Mar. 1963.

محمود محصل فقهی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق (با درجه ممتاز) به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۸ در دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رساند. نام‌برده از سال ۱۳۸۷ به عنوان پژوهشگر و مجری پروژه‌های مختلف تحقیقاتی و صنعتی در صنایع مخابرات کشور فعالیت داشته و در سال ۱۳۸۹ به دوره دکترای مهندسی برق و کامپیوتر در پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران وارد گردید و در سال ۱۳۹۴ موفق به اخذ درجه دکتری تخصصی در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. زمینه‌های علمی و تحقیقاتی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل نظریه اطلاعات شبکه‌ای، نظریه مخابرات، سامانه‌های بی‌سیم و به طور خاص بهینه‌سازی و تخصیص منابع در شبکه‌های مخابراتی جاذب انرژی می‌باشد.

علی‌اعظم عباسفر تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی (با درجه ممتاز) و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۱ و ۱۳۷۴ در دانشگاه تهران و مقطع دکتری تخصصی مهندسی برق در سال ۱۳۸۴ در دانشگاه کالیفرنیا لس‌آنجلس (UCLA) به پایان رساند. از سال ۱۳۸۰ الی ۱۳۸۳ نام‌برده به عنوان مهندس طراح ارشد در حوزه طراحی دیجیتال سامانه‌های مخابراتی در شرکت‌های Sequoia, Innovics و Jaalaa در ایالت کالیفرنیا مشغول به فعالیت بود. پس از فارغ‌التحصیلی از دانشگاه UCLA، وی به شرکت Rambus پیوست که در آنجا به عنوان مهندس اصلی به فعالیت در زمینه مخابرات داده با سرعت بالا بر روی لینک‌های سیمی سری و موازی می‌پرداخت. ایشان هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران می‌باشند. دکتر عباسفر مؤلف بیش از ۴۰ مقاله ژورنال و کنفرانس و نیز یک کتاب تحت عنوان "کدهای توربو: طراحی برای کدگذاری با سرعت بالا" به زبان انگلیسی و نیز دارای ده اختراع ثبت‌شده و نیز بیش از ده مورد در آستانه ثبت می‌باشد. همچنین وی برنده جایزه مقاله برگزیده انجمن‌های مخابرات و نظریه اطلاعات IEEE در سال ۱۳۸۷ و نیز برنده مشترک بهترین مقاله دانشجویی در کنفرانس IEEE GLOBECOM در سال ۱۳۸۵ شده و زمینه‌های اصلی تحقیقاتی ایشان شامل مخابرات سیمی و بی‌سیم، همسان‌سازی، کدهای تصحیح‌کننده خطا و VLSI برای مخابرات داده‌های دیجیتال می‌باشد.

داریم $T_s = t_1 + t_r + t_p$. برای رابطه توان بر حسب نرخ که به صورت کلی $p = g(r)$ نمایش داده می‌شود، مجموع مدت زمان عدم ارسال به دلیل کسری انرژی با توجه به شکل ۶ به صورت زیر خواهد بود

$$T_s = T_i - \frac{S_i}{g(R)} \quad (\text{پ-۲})$$

که در آن $g(R)$ حداقل توان مورد نیاز برای ارسال اطلاعات با نرخ R (یا شیب منحنی ارسال نشان داده شده در شکل ۶)، T_i (امین لحظه جذب انرژی و

$$\tilde{i} = \arg \max_i \left\{ T_i - \frac{S_i}{g(R)} \right\} \quad (\text{پ-۳})$$

اکنون می‌توانیم ESP برای نرخ ثابت داده‌شده R را فرموله کنیم. برای پروفایل EH داده‌شده $\{E_i, i=0, \dots, M-1\}$ مقدار ESP شرطی به صورت زیر خواهد شد

$$P_{es}(R, M) \Big|_{\{E_i\}_{i=0}^{M-1}} = \max_{n=1, \dots, M} \frac{[n\Delta t - \frac{S_{n-1}}{g(R)}]^+}{M\Delta t} = \quad (\text{پ-۴})$$

$$\left[\max_{n=1, \dots, M} \frac{n}{M} \left(1 - \frac{S_{n-1}}{ng(R)\Delta t} \right) \right]^+$$

با متوسط‌گیری روی مقادیر جذب انرژی، (۲۴) به دست می‌آید.

مراجع

- [1] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy harvesting sensor nodes: survey and implications," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 3, pp. 443-461, Third Quarter 2011.
- [2] T. Zhu, A. Mohaisen, P. Yi, and J. Ma, "Green Ad Hoc and sensor networks," in *Green Communications: Theoretical Fundamentals, Algorithms and Applications*, J. Wu, S. Rangan, and H. Zhang, Eds., ed Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, pp. 305-320, 2012.
- [3] V. Raghunathan, S. Ganeriwal, and M. Srivastava, "Emerging techniques for long lived wireless sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, no. 4, pp. 108-114, Apr. 2006.
- [4] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, and M. B. Srivastava, "Power management in energy harvesting sensor networks," *ACM. Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 6, no. 4, pp. 1-8, Sep. 2007.
- [5] V. Sharma, U. Mukherji, V. Joseph, and S. Gupta, "Optimal energy management policies for energy harvesting sensor nodes," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 4, pp. 1326-1336, Apr. 2010.
- [6] R. Rajesh, V. Sharma, and P. Viswanath, "Information capacity of energy harvesting sensor nodes," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory, ISIT'11* pp. 2363-2367, Saint-Petersburg, Russia, 31 Jul.- 5 Aug. 2011.
- [7] O. Ozel and S. Ulukus, "Achieving AWGN capacity under stochastic energy harvesting," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, no. 10, pp. 6471-6483, Oct. 2012.
- [8] J. Yang and S. Ulukus, "Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 1, pp. 220-230, Jan. 2012.