

بررسی تأثیر اجرای سازوکارهای بهره‌وری انرژی بر ظرفیت‌سنجی اقتصادی سیستم تأمین برق تجدیدپذیر برای ایستگاه‌های پایه مخابرات موبایل

بهروز عظیمی امینی^۱، وحید محتشمی^۲ و حسین ابوترابی زارچی^۳

^۱دانشگاه فردوسی مشهد، Behrooz.azimi21@gmail.com

^۲دانشگاه فردوسی مشهد، V.mohtashami@um.ac.ir

^۳دانشگاه فردوسی مشهد، Abootorabi@um.ac.ir

چکیده – توسعه مخابرات موبایل و ضرورت پوشش‌دهی پیوسته کاربران منجر به افزایش تعداد ایستگاه‌های پایه مخابرات موبایل و رشد مصرف انرژی آن‌ها شده است. در نتیجه، چالش‌هایی در تأمین پایدار انرژی برای ایستگاه‌های پایه منفصل از شبکه برق ایجاد شده که علاوه بر کاهش پوشش در مناطق روستایی و بین شهری، هزینه‌های جاری زیادی برای اپراتور موبایل دارد. از دیدگاه زیست‌محیطی نیز مصرف سوخت‌های فسیلی در دیزل ژنراتورهای این ایستگاه‌ها منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین برق ایستگاه پایه راهکاری مؤثر در رفع چالش‌های فوق‌الذکر است که البته به بهینه‌سازی فنی-اقتصادی با در نظر گرفتن ملاحظات مصرف انرژی در ایستگاه پایه احتیاج دارد. در این مقاله به ظرفیت‌سنجی فنی-اقتصادی تأمین برق ایستگاه‌های پایه مخابرات موبایل در شرایط عدم دسترسی به شبکه برق پرداخته می‌شود. ابتدا پروفایل مصرف انرژی ایستگاه پایه مدل شده و سپس ظرفیت بهینه صفحات خورشیدی و باتری‌ها با حداقل‌سازی هزینه در طول عمر پروژه به دست می‌آید. همچنین، تأثیر اجرای راهکارهای بهره‌وری انرژی (خواب سلول مخابراتی، به‌روزرسانی قطعات فرسوده و سیستم سرمایشی) بر ظرفیت صفحات خورشیدی و باتری‌ها بررسی می‌شود. نتایج بهینه-سازی با نرم‌افزار HOMER نشان می‌دهد که اجرای راهکارهای بهره‌وری انرژی می‌تواند تا ۵۰ درصد هزینه اجرای سیستم تأمین برق را کاهش دهد.

کلید واژه-ایستگاه پایه خورشیدی، انرژی‌های تجدیدپذیر، فناوری مخابرات سبز، سازوکارهای بهره‌وری انرژی

شبکه مخابرات موبایل را ایستگاه‌های پایه مصرف می‌کنند [۱]. از این رو، تأمین پایدار برق ایستگاه‌های پایه اهمیت فراوانی در برقراری پوشش پیوسته مخابرات موبایل دارد.

ایستگاه‌های پایه مخابرات موبایل را می‌توان بر اساس دسترسی به شبکه برق به دو دسته متصل به شبکه برق^۲ و منفصل از شبکه برق^۱ تقسیم کرد. ایستگاه‌های پایه در مناطق شهری عموماً متصل به شبکه برق هستند و در کشورهایی با سطح رفاه متوسط، از پایداری شبکه برق بهره‌مند هستند. در مقابل، ایستگاه‌های پایه در مناطق بین

۱- مقدمه

شبکه مخابرات موبایل سهم عمده‌ای از برقراری ارتباط کاربران در زیست‌بوم فناوری اطلاعات و ارتباطات را به خود اختصاص داده است. تعداد کاربران و تقاضای آنها برای دسترسی به پهنای باند و سرعت بیشتر رشد چشمگیری داشته و سبب توسعه شبکه مخابرات موبایل شده است. برای برآورده ساختن این نیازها، احتیاج به افزایش قابل توجه تعداد ایستگاه‌های پایه^۱ است. از طرفی حدود ۷۰٪ انرژی

^۳ Off-grid

^۱ Base stations

^۲ On-grid

طراحی ایستگاه‌های پایه مجهز به انرژی خورشیدی را ارائه کرده‌اند [۵]، [۶]. اتحادیه جهانی اپراتورهای موبایل^۷ (که منافع اپراتورهای شبکه تلفن همراه را در سراسر جهان نمایندگی می‌کند) برنامه «انرژی سبز برای مخابرات موبایل» را در سطح بین‌المللی اجرا نموده است [۷]. گروه‌های تحقیقاتی در سطح دانشگاهی نیز به بهینه‌سازی فنی-اقتصادی ظرفیت اجزای سیستم انرژی خورشیدی برای ایستگاه‌های پایه مبتنی بر استفاده از نرم‌افزار HOMER پرداخته‌اند [۸]، [۹].

در این مقاله به ظرفیت‌سنجی سیستم انرژی خورشیدی برای یک ایستگاه پایه منفصل از شبکه برق پرداخته می‌شود. نکته مهم در فرآیند طراحی، آن است که پیش از ظرفیت‌سنجی، بهتر است سمت مصرف انرژی کنترل شود. راهکارهای بهره‌وری انرژی در ایستگاه پایه در قالب مجموعه‌ای از توصیه‌نامه‌های اتحادیه جهانی مخابرات ITU^۸ و دستورالعمل‌های فنی 3GPP^۹ وجود دارد [۱۰]-[۱۱]. در این مقاله، اثر اجرای این راهکارها بر کاهش ظرفیت مورد نیاز صفحات خورشیدی و باتری‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هنگام اجرای فرآیند ظرفیت‌سنجی، مسئله بهینه‌سازی مجموع هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی در طول عمر پروژه و با لحاظ اثر کاهش ارزش پول مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ادامه این مقاله به صورت زیر تنظیم شده است. در بخش دوم دیگرام و مدل ایستگاه پایه خورشیدی، باتری‌ها و صفحات خورشیدی و نیز نحوه مدل‌سازی‌های بارهای رادیویی و سرمایه‌ی ارائه شده است. بخش سوم نحوه بهینه‌سازی، تابع هدف و قیدهای آن را معرفی می‌کند. در بخش چهارم راهکارهای بهره‌وری انرژی و تأثیر اقتصادی آن بر روی پروژه، و همچنین اثر مطلوبی که در کاهش میزان انرژی اضافی استحصال شده از صفحات خورشیدی دارند تجزیه و تحلیل شده است. بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری از این مقاله را ارائه می‌دهد.

۲- ایستگاه پایه مجهز به انرژی خورشیدی

از دیدگاه مدل‌سازی سیستمی، ایستگاه‌های پایه خورشیدی از سه بخش اصلی شامل بار مخابراتی، بار سرمایه‌ی و سیستم تأمین انرژی خورشیدی تشکیل شده‌اند و سایر بخش‌ها در جهت کنترل عملکرد کنار بخش‌های اصلی قرار گرفته‌اند. شکل ۱ نمایی از یک

شهری و روستایی با ریسک عدم بر خورداری از شبکه برق مواجه می‌باشند. این مشکل از آنجا ناشی می‌شود که در فرآیند طرح‌ریزی شبکه موبایل^۴، لزوماً محل ایستگاه‌های پایه در مجاورت خطوط انتقال برق واقع نمی‌شود. برای تأمین برق چنین ایستگاه‌هایی معمولاً از دیزل-ژنراتور استفاده می‌شود. دیزل ژنراتورها هزینه سرمایه‌ای^۵ نسبتاً کمی برای استقرار دارند، اما مخزن آن‌ها مرتباً (معمولاً به صورت هفته‌ای) باید از گازوئیل پر شود و تعمیر و نگهداری مداومی (معمولاً هر ۲۵۰ ساعت) لازم دارد. به علاوه، دیزل ژنراتورهای کوچک (در محدوده ۱۰-۲۰ کیلوولت‌آمپر) حدوداً هر ۱۲۰۰۰ ساعت (یک سال و نیم) باید اورهال یا اسقاط شوند. در نتیجه هزینه‌های عملیاتی^۶ استفاده از دیزل ژنراتورها نیز زیاد است [۲]. همچنین مشکلاتی نظیر سرعت سوخت، وضع شدن قوانین جدی در جهت محدودیت انتشار گازهای گلخانه‌ای در برخی از کشورها [۳]، و احتمال آزادسازی قریب‌الوقوع قیمت گازوئیل در کشور ایران (از ۳۰۰ تومان فعلی در هر لیتر به قیمت فوب خلیج فارس که در حال حاضر بیش از ۱۰,۰۰۰ تومان در هر لیتر) ریسک استفاده از دیزل ژنراتورها را در برهه کنونی برای اپراتورهای موبایل افزایش داده است. مجهز کردن ایستگاه‌های پایه منفصل از شبکه برق به انرژی خورشیدی در اقلیم آفتاب‌گیر ایران، یکی از راه‌های موثر در بهبود ریسک‌های فوق‌الذکر و علی‌الخصوص کاهش قابل توجه هزینه‌های عملیاتی می‌باشد. البته به علت هزینه سرمایه‌ای نسبتاً بالا، اجرای سیستم تأمین برق خورشیدی می‌بایست با راهکارهای بهره‌وری انرژی توأمان اجرا شود و ظرفیت اجزای سیستم از طریق بهینه‌سازی فنی-اقتصادی حاصل شود.

در زمینه پیاده‌سازی ایستگاه‌های پایه مجهز به انرژی‌های تجدیدپذیر و مقایسه آنها با سایت‌های مرسوم که از انرژی فسیلی به عنوان منبع اصلی و یا پشتیبان برای سرویس‌دهی استفاده می‌کنند، مطالعات گوناگونی در کشورهای مختلف انجام شده است [۴]-[۹]. ملاحظات اجزای سیستم تأمین برق خورشیدی (شامل صفحات خورشیدی، باتری‌ها، اینورتر و سیستم یکپارچه مدیریت توان) در مقاله پراجاع [۴] ذکر شده و در آن معیارهای کلی طراحی برای حصول کیفیت مناسب سرویس مخابراتی ارائه است. اپراتورهای پیشگام نظیر NTT Docomo (ژاپن) و Orange (فرانسه) موارد متعدد

^۷ Global System for Mobile Association (GSMA)

^۸ International Telecommunication Union (ITU)

^۹ 3rd Generation Partnership Project (3GPP)

^۴ Mobile network planning

^۵ Capital Expenditure (CAPEX)

^۶ Operational Expenditure (OPEX)

پایه ممکن است مقداری تغییر کند. پس از بهینه‌سازی و یافتن ظرفیت بهینه، تعداد لازم از هر یک از این ماژول‌ها در کنار هم قرار می‌گیرند تا آن ظرفیت را ایجاد کنند.

جدول ۱: برآورد اقتصادی تجهیزات سیستم خورشیدی

نوع تجهیز	عمر	ظرفیت	هزینه اولیه سرمایه گذاری (دلار)	هزینه تعمیرات و نگهداری (دلار)	هزینه جایگزینی (دلار)
صفحات خورشیدی	۲۵ سال	۴۰۰ وات	۳۸۱	۱۶	۳۸۱
باتری اسید-سربی	عمر تقویمی ۱۲ سال	۴۲۰ آمپر ساعت ۶ ولت	۳۱۰	۱۰	۳۱۰
	عمر توانی ۱۵۸۰ kwh				
اینورتر	۱۰ سال	۱ کیلووات	۱۹۲	--	۱۹۲
		۲ کیلووات	۳۳۹	--	۳۳۹
		۳ کیلووات	۴۹۳	--	۴۹۳
		۴ کیلووات	۶۹۲	--	۶۹۲
شارژ کنترلر	۱۰ سال	۱،۵۶ کیلووات	۱۲۶	--	۱۲۶

۲-۲- مدلسازی بار مخابراتی

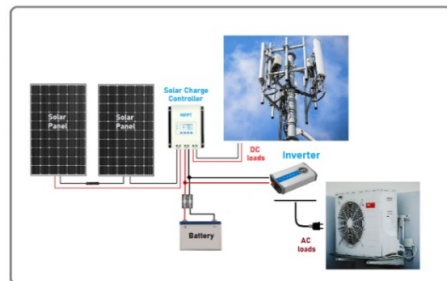
توان مصرفی لحظه‌ای یک ایستگاه پایه را می‌توان با رابطه (۱) نمایش داد [۱۳]:

$$P_{in} = N_{TRX} \frac{P_{out}}{\eta_{PA}(1-\sigma_{feed})} + P_{RF} + P_{BB} \quad (1)$$

که در آن P_{in} توان مصرفی ایستگاه پایه است که از مجموع توان‌های مصرفی P_{RF} (توان مصرفی بخش فرکانس رادیویی)، P_{BB} (توان مصرفی پردازش سیگنال باند پایه) و P_{out} (توان تشعشعی آنتن‌ها در فرستنده مخابراتی) تشکیل شده است. در این رابطه نیز η_{PA} بازده تقویت‌کننده توان است و σ_{DC} ، σ_{MS} ، σ_{cool} به ترتیب ضریب تلفات خط انتقال متصل‌کننده آنتن و مدار فرستنده، ضریب تلفات مدارهای تقسیم ولتاژ DC به DC، ضریب تلفات منبع تغذیه، و سربار توان مصرفی بخش سرمایه‌ی در ایستگاه پایه می‌باشد. از طرفی N_{TRX} نیز تعداد زنجیره‌های رادیویی فرستنده-گیرنده مخابراتی است که بر اساس نیاز ترافیک مخابراتی توسط اپراتور طراحی می‌شود.

برای برآورد پروفایل زمانی توان مصرفی می‌توان از داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده کرد یا از برآوردهای مبتنی بر ترافیک مصرفی کاربران بهره‌گیری نمود. در این مقاله، به دلیل فقدان داده‌های اندازه‌گیری توان مصرفی ایستگاه پایه منفصل از شبکه، از رویکرد دوم استفاده شده است. در رابطه (۱)، مقدار P_{RF} ، P_{BB} معمولاً بسیار کوچکتر از جمله مربوط به تقویت‌کننده توان در صورت کسر می‌باشند؛ بنابراین مصرف انرژی لحظه‌ای ایستگاه پایه ارتباط تقریباً مستقیمی با توان تشعشعی آنتن‌ها دارد. توان تشعشعی آنتن‌ها نیز متناسب با ترافیک درخواستی کاربران است. بنابراین برای مدلسازی لحظه‌ای انرژی مصرفی ایستگاه پایه بایستی پروفایل ترافیک درخواستی سایت را مورد بررسی قرار داد. نمونه‌ای از مدل ترافیک مصرفی کاربران در یک ایستگاه پایه مبتنی بر خروجی‌های پروژه بین‌المللی LEXNET در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۴]. این شکل میزان تایم‌اسلات‌های (time slots) اشغال‌شده از منابع رادیویی یک ایستگاه پایه نسل دوم (سرویس GSM) را برای مدت یک هفته نشان می‌دهد. سرویس GSM متداول‌ترین سرویسی است که در حال حاضر در کشور ایران برای ایستگاه‌های پایه منفصل از شبکه برق به کار گرفته شده است. مقدار توان تشعشعی آنتن‌ها و در نتیجه انرژی

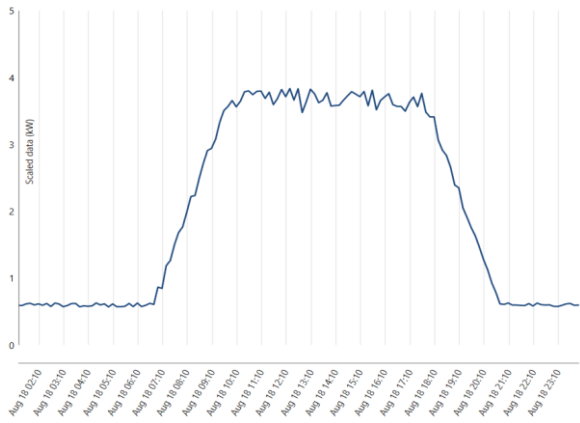
ایستگاه پایه خورشیدی را نشان می‌دهد که بخش مخابراتی آن مشابه با ایستگاه‌های پایه متداول است. علاوه بر آن، مجموعه باتری‌ها، شارژکنترلر و صفحات خورشیدی، بخش سیستم تأمین انرژی خورشیدی را تشکیل می‌دهند و به کمک واحد یکپارچه‌سازی توان با بخش مخابراتی ارتباط برقرار می‌کنند. بخش سرمایه‌ی نیز در جهت خنک‌سازی تجهیزات مخابراتی و نیز باتری‌ها استفاده می‌شود.



شکل ۱: بلوک دیاگرام ایستگاه پایه خورشیدی

۲-۱- تجهیزات اصلی سیستم خورشیدی

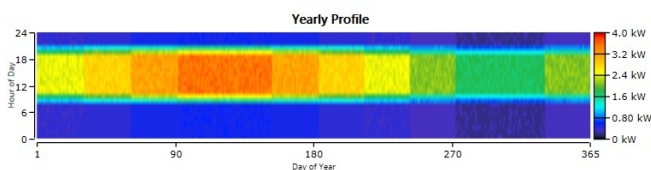
در این مقاله از پنل‌های فتوولتائیک ۴۰۰ واتی مونوکریستال با بازده ۲۰٪ به عنوان صفحات خورشیدی پایه استفاده شده است. همچنین از باتری‌های اسید-سربی، نوع رایج باتری‌های مورد استفاده در سیستم‌های خورشیدی با عمق تخلیه ۶۰٪ استفاده شده است. برای مدلسازی باتری‌ها از مدل انرژی جنبشی [۱۲] که رفتار باتری-های اسید-سربی را به خوبی مدلسازی می‌کند، استفاده شده است. اینورتر و شارژکنترلر که به ترتیب وظیفه تبدیل ولتاژ DC به AC و کنترل شارژ باتری‌ها را بر عهده دارند، دارای بازده‌های ۹۴٪ و ۹۸٪ می‌باشند. جدول ۱ سایر مشخصات این تجهیزات را نشان می‌دهد؛ البته با تغییر نشان تجاری و ظرفیت اجزای سیستم، هزینه‌های اجزای



شکل ۳: پروفایل روزانه بار بخش مخابراتی

۳-۲- مدلسازی بار بخش سرمایه‌ی

از آنجایی که افزایش بار بخش مخابراتی به معنای افزایش انرژی مورد نیاز برای خنک‌سازی تجهیزات است بنابراین بار بخش سرمایه‌ی ارتباط مستقیمی با بار بخش مخابراتی دارد و می‌توان الگوی روزانه رفتاری آن را مطابق الگوی بخش بار مخابراتی در نظر گرفت. از طرفی این بار برخلاف بار بخش مخابراتی، دارای توزیع فصلی است به‌گونه‌ای که در فصول سرد سال به علت دمای پایین محیط، وزن این بار به مقدار قابل توجهی کاهش و در فصول گرم میزان این بار تا حد مصرف انرژی بار بخش مخابراتی افزایش خواهد یافت. بنابراین بار این بخش دارای توزیع فصلی با ضریب ۱ برابر بار مخابراتی در دو ماه گرم تابستان [۲] و ضریب ۰٫۵ برابر بار مخابراتی در دو ماه سرد زمستان تنظیم شده و به صورت خطی متناسب با ماه‌های سال بین این دو ضریب افزایش و کاهش خواهد داشت. شکل ۴ توزیع فصلی این بار را برای یکسال نشان می‌دهد.

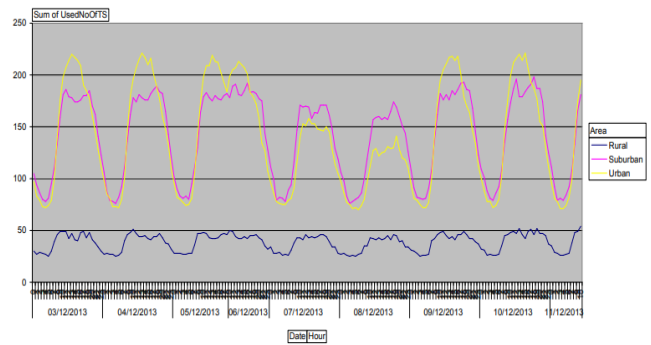


شکل ۴: پروفایل فصلی بار بخش سرمایه‌ی

۳- بهینه‌سازی اقتصادی تأمین انرژی خورشیدی

نرم‌افزار HOMER ابزار شبیه‌سازی مناسبی برای بهینه‌سازی اجزای یک سیستم تأمین انرژی خورشیدی تلقی می‌شود. این نرم‌افزار

مصرفی ایستگاه پایه نیز الگوی زمانی مشابه با این شکل دارد.



شکل ۲: نمودار تایم اسلات‌های اشغال شده از منابع رادیویی ایستگاه‌های پایه با سرویس GSM [۱۴]

همانگونه که در شکل ۲ نیز نشان داده شده است مصرف انرژی ایستگاه پایه در هیچ زمانی صفر نیست. این امر به دلیل وجود سیگنال‌های کنترلی مخابراتی در هر ایستگاه پایه است که به صورت مداوم و با حداکثر توان می‌بایست ارسال شوند. برای مناطق روستایی (rural - نمودار آبی‌رنگ در شکل ۲) می‌توان ترافیک مصرفی کاربران و در نتیجه، پروفایل روزانه مصرف انرژی بخش مخابراتی در ایستگاه پایه را با دقت مطلوبی به شکل دوزنقه‌ای در نظر گرفت. شکل ۳ نمونه بازتولیدشده این پروفایل را برای شبیه‌سازی‌های این مقاله نشان می‌دهد. از نیمه شب تا اوایل صبح میزان مصرف انرژی ایستگاه پایه در کمترین مقدار، و از ساعت ۱۰ صبح تا ساعت ۱۸ در اوج می‌باشد. این پروفایل تابع روزهای هفته نیست (نمودار آبی‌رنگ در شکل ۲ را ببینید) و می‌توان با دقت خوبی آن را برای تمامی ۳۶۵ روز یک سال تعمیم داد. پارامترهای این مدل بر اساس مصرف انرژی روزانه ۴۸ کیلووات ساعت تنظیم شده است [۲]. میزان مصرف حداقلی از ۶۰۰ وات ساعت آغاز می‌شود و در ساعات اوج به محدوده ۳٫۶۵ کیلووات-ساعت می‌رسد. همچنین بر روی این مدل توزیع دوزنقه‌ای، توزیع تصادفی گاوسی پیاده شده است. این رفتار تصادفی به علت وجود ماهیت تصادفی ارتباط کاربران با ایستگاه پایه است. انحراف معیار توزیع گاوسی در هر ساعت برابر با ۱۰٪ مصرف متوسط آن ساعت در نظر گرفته شده است. در نتیجه، برای هر یک از ۳۶۵ روز هر سال، یک پروفایل مصرف انرژی متفاوت لحاظ شده که البته همه آن‌ها از نظر مقدار متوسط، توزیع دوزنقه‌ای شکل ۳ را دارا هستند.

عمر یک نسل از سرویس مخابرات موبایل معمولاً ۱۰ سال در نظر گرفته می‌شود. در طول ۱۰ سال عمر پروژه از آنجایی که به دلیل رشد تعداد کاربران، ترافیک مصرفی افزایش پیدا می‌کند، بار مصرفی بخش مخابراتی نیز افزایش می‌یابد. میزان افزایش سالانه ۲٪ برای مصرف انرژی بخش مخابراتی در مدلسازی در نظر گرفته شده است.

۳-۲- قیدهای بهینه‌سازی

در این بخش قیودی که تحت برآورد آن شرایط، ظرفیت‌سنجی تجهیزات با تابع هدف معرفی شده، مورد قبول است، ارائه می‌شوند. قید اول طراحی، قابلیت اطمینان سیستم است. همانگونه که معرفی شد به علت رفتار تصادفی اتصال کاربران به ایستگاه مربوطه، ممکن است به صورت لحظه‌ای در هر گام شبیه‌سازی مصرف انرژی افزایش یابد. این قید تحت عنوان بار رزرو^{۱۲} در هر لحظه نام دارد که به صورت معادله (۶) تعریف می‌شود:

$$E_{PV} + E_{Battery} \geq 1.1(E_{BS} + E_{Losses}) \quad (6)$$

که در آن، E_{PV} انرژی تولیدی توسط صفحات خورشیدی، $E_{Battery}$ انرژی موجود مجموعه باتری‌ها، E_{BS} مجموعه تقاضای بار ایستگاه پایه (بار مخابراتی + بار پردازشی) و E_{Losses} تلفات موجود ناشی از اینورتر، شارژکنترلر، سیم‌کشی‌ها و سایر تلفات موجود است. البته به دلیل تصادفی بودن بار، قید مذکور در تمام طول عمر پروژه ممکن است برآورده نشود؛ در ارزیابی نتایج شبیه‌سازی، این قید تقریباً معادل با احتمال قطع سرویس لحظه‌ای کمتر از ۱٪ احصا شده است که برای شبکه مخابرات موبایل مطلوب می‌باشد.

۴- سازوکارهای بهره‌وری انرژی

سازوکارهای بهره‌وری انرژی در صورت پیاده‌سازی می‌توانند تأثیر بسزایی در کاهش مصرف انرژی ایستگاه پایه داشته باشند. در این بخش اثر مهمترین موارد یاد شده نظیر سازوکارهای خواب سلول^{۱۴}، به‌روزرسانی تجهیزات مخابراتی، و نیز جایگزینی سیستم‌های سرمایشی متداول با سیستم‌های نوین سرمایشی به صورت جداگانه تحلیل شده است.

پیش از ارائه نتایج اعمال سازوکارهای بهره‌وری انرژی بر ظرفیت اجزای سیستم انرژی خورشیدی برخی مفروضات مهم شبیه‌سازی‌ها مطرح می‌شود. اول آنکه از پایگاه داده سازمان NASA برای حصول داده‌های تابشی موقعیت جغرافیایی مشهد استفاده شده است. نکته دوم آنکه تمامی شبیه‌سازی‌ها با رزولوشن زمانی ۱۰ دقیقه‌ای انجام شده‌اند که از دیدگاه اتحادیه جهانی مخابرات ITU رزولوشن مناسبی

توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده^{۱۰} برای ساده‌سازی طراحی سیستم‌های خورشیدی و ارزیابی پیکربندی‌های مختلف سیستم طراحی شده است [۱۲]. در این مدل، سیستم طراحی شده بهینه آن سیستمی است که دارای کمترین هزینه خالص فعلی NPC^{۱۱} می‌باشد. هزینه خالص فعلی از مجموع درآمدها و هزینه‌ها در کل طول عمر پروژه بدست می‌آید و شامل هرگونه هزینه اولیه سرمایه‌گذاری، هزینه تعمیر و نگهداری و هزینه جایگزینی اجزای پروژه، با در نظر گرفتن نرخ تورم، نرخ بهره و ارزش اسقاطی آن در پایان عمر آن می‌باشد.

۳-۱- تابع هدف بهینه‌سازی

تابع هدف در نرم‌افزار HOMER، هزینه خالص فعلی است. یعنی طرحی برنده است که دارای کمترین هزینه خالص فعلی باشد. این معیار با معادله (۲) تعریف می‌شود:

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann-tot}}{CRF(i,N)} - S \quad (2)$$

در معادله (۲)، $C_{ann-tot}$ کل هزینه سالانه را نشان می‌دهد که از مجموع C_{ann}^{cap} (کل هزینه اولیه)، $C_{ann}^{o\&m}$ (کل هزینه تعمیر و نگهداری) و C_{ann}^{rep} (کل هزینه جایگزینی) بدست می‌آید. معادله (۳) رابطه ریاضی آن را نشان می‌دهد:

$$C_{ann-tot} = C_{ann}^{cap} + C_{ann}^{o\&m} + C_{ann}^{rep} \quad (3)$$

همچنین $CRF(i,N)$ تحت عنوان فاکتور بازیابی سرمایه^{۱۲} تعریف می‌شود که برای تبدیل هزینه‌های سالانه به هزینه خالص فعلی در پایان طول دوره استفاده می‌شود. این فاکتور از معادله (۴) تعیین می‌شود:

$$CRF(i,N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (4)$$

که در آن، i نرخ بهره سالانه و N طول دوره با واحد سال است. از طرفی S در معادله (۲) ارزش اسقاطی تجهیزات در پایان دوره می‌باشد که از معادله (۵) محاسبه می‌شود:

$$S = C_{rep} \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \quad (5)$$

در معادله (۵)، C_{rep} هزینه جایگزینی قطعه، R_{rem} طول عمر باقی‌مانده قطعه و R_{comp} کل طول عمر قطعه با واحد سال است.

^{۱۲} Operating Reserve

^{۱۴} Cell sleep mode

^{۱۰} National Renewable Energy Laboratory (NREL)

^{۱۱} Net Present Cost (NPC)

^{۱۲} Capital Recovery Factor (CRF)

۴-۲- به‌روزرسانی تجهیزات فرسوده

رشد و پیشرفت تکنولوژی در زمینه ساخت تجهیزات مخابراتی جدید، منجر به تولید قطعاتی با بازده و کارایی بیشتر شده است. این تجهیزات شامل بخش‌های واحد منبع تغذیه، واحد پردازش سیگنال دیجیتال، تقویت کننده‌های توان و نیز بخش آنالوگ می‌باشد. حدود ۶۰٪ از بار بخش مخابراتی ایستگاه‌های پایه را تقویت کننده‌های توان مصرف می‌کنند [۱]. به همین منظور تحقیقات بسیاری برای بهبود عملکرد این تقویت کننده‌ها انجام شده که منجر به ارتقای بازده آن‌ها (η_{PA} در رابطه (۱)) شده است. به طور خاص برای ایستگاه‌های پایه نسل دوم از تقویت کننده‌های توان کلاس AB استفاده می‌شود. بازده نسل اولیه این تقویت کننده‌ها حدود ۲۰٪ بوده است که بهبود کارایی در این زمینه منجر به ایجاد تقویت کننده‌هایی با بازده‌های بالاتر شده است. بهبود کارایی تقویت کننده‌های توان با توجه به اینکه حدود ۶۰ درصد از کل انرژی بار بخش مخابراتی را مصرف می‌کنند، منجر به کاهش قابل توجه مصرف انرژی بخش مخابراتی می‌شود. جدول ۳ نتایج استفاده از تقویت کننده‌های جدیدتر را نشان می‌دهد. استفاده از تقویت کننده با بازده ۲۵٪ و ۳۰٪ به ترتیب باعث کاهش ۱۲ و ۲۰ درصدی در میزان کل مصرف انرژی خواهد شد. در نتیجه، نیاز به ظرفیت کمتری برای صفحات خورشیدی و باتری‌ها وجود دارد که برای ۱۰ سال عمر کل پروژه منجر به صرفه‌جویی به ترتیب ۱۱ و ۱۹ درصدی در هزینه خالص فعلی می‌شود. البته توجه داریم که این به‌روزرسانی، هزینه‌ای دارد؛ لیکن اگر این هزینه در قیاس با کاهش ایجادشده در هزینه اولیه سرمایه‌گذاری کمتر باشد، به‌روزرسانی تقویت کننده توان مقرون‌به‌صرفه خواهد بود.

جدول ۳: مقایسه استفاده از تقویت کننده‌های توان نسل جدیدتر

NPC (دلار)	هزینه اولیه سرمایه‌گذاری (دلار)	تعداد باتری‌ها (عدد)	ظرفیت پنل‌ها (kw)	میزان کاهش مصرف انرژی کل (%)	میزان مصرف انرژی کل (kwh)	تقویت کننده توان
۳۶۰۳۹	۲۴۶۴۷	۳۲	۳۳٫۲	--	۸۴	تقویت کننده‌های توان کلاس AB بازده ۲۰ درصد
۳۲۰۴۲	۲۲۲۰۹	۳۲	۲۶٫۸	۱۲	۷۳٫۹	تقویت کننده‌های توان کلاس AB بازده ۲۵ درصد
۲۹۲۷۹	۲۰۱۸۶	۲۴	۲۸	۲۰	۶۷٫۲	تقویت کننده‌های توان کلاس AB بازده ۳۰ درصد

برای در نظر گرفتن رفتارهای لحظه‌ای انرژی مصرفی ایستگاه پایه می‌باشد [۱۵].

۴-۱- خواب سلول

یکی از رایج‌ترین روش‌هایی که برای خواب سلول ایستگاه‌های پایه فناوری نسل دوم مخابرات موبایل کاربرد دارد، استفاده از روش خاموش‌سازی کانال‌های فرکانسی مازاد در زمان‌های ترافیک بسیار کم است [۱۱]. منابع فرکانسی شبکه مخابرات موبایل بر اساس پاسخگویی به تقاضای کاربران در اوج بار طراحی می‌شوند. از این رو در ساعات‌های کم‌ترافیک (اواخر شب تا اوایل صبح) منابع فرکانسی مازادی در ایستگاه پایه وجود دارد. به همین منظور در این ساعات، تعدادی از زنجیره‌های رادیویی خاموش می‌شوند (کاهش N_{TRX} در رابطه (۱)). جدول ۲ نتایج بهینه‌سازی انجام‌شده با نرم‌افزار HOMER را نشان می‌دهد. در طراحی پایه (حالت عادی) بار بخش مخابراتی مطابق شکل ۳ لحاظ شده است؛ در حالت کاهش ۲۵٪ و ۵۰٪ منابع، بار ساعات کم‌باری (ساعت ۹ شب تا ۷ صبح روز بعد) از ۶۰۰ وات به ترتیب به ۴۵۰ وات و ۳۰۰ وات کاهش یافته است. از آنجایی که عمده فشار سیستم بیشتر نیز در ساعات نبود تابش خورشید وجود دارد و زمان‌های کم‌باری ایستگاه پایه دقیقاً منطبق بر این ساعات هستند بنابراین استفاده از مکانیزم‌های خواب سلول می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش ظرفیت مورد نیاز صفحات خورشیدی و باتری‌ها داشته باشد. همان‌طور که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود خاموش کردن این منابع مازاد بدون ایجاد خلل در قابلیت اطمینان سیستم، سبب کاهش ظرفیت صفحات خورشیدی و یا باتری‌ها شده است و تا بیش از ۱۵ درصد از هزینه خالص فعلی را کاهش داده است. از منظر سرمایه‌گذاری اولیه نیز خواب سلول سبب کاهش این نوع هزینه شده است.

جدول ۲: مقایسه مکانیزم‌های متفاوت خواب سلول بخش مخابراتی

NPC (دلار)	هزینه اولیه سرمایه‌گذاری (دلار)	تعداد باتری‌ها (عدد)	ظرفیت پنل‌ها (kw)	میزان مصرف انرژی کل (kwh)	میزان کمینه مصرف انرژی کل (W)	مدلسازی بار بخش مخابراتی
۳۶۰۳۹	۲۴۶۴۷	۳۲	۳۳٫۲	۸۴	۶۰۰	حالت عادی
۳۳۵۵۷	۲۳۴۲۸	۳۲	۳۰	۸۱	۴۵۰	کاهش ۲۵ درصدی منابع
۳۰۶۴۷	۲۱۷۱۰	۲۴	۳۲	۷۷	۳۰۰	مکانیزم ۵۰ درصدی منابع

۴-۳- کنترل هوشمند کمپرسورهای سرمایشی با مبدل های حرارتی و تهویه‌ها

دارد که از طریق سنسورهای دما و رطوبت برای نظارت مداوم بر این دو پارامتر محیطی در خارج و داخل محفظه ایستگاه پایه استفاده می‌کند. هنگامی که اختلاف دما بیشتر از مقدار ازپیش تعریف شده باشد، کنترل کننده هوشمند درب هوای ورودی را باز و یک فن را برای دمیدن هوای سرد از بیرون به داخل اتاق فعال می‌کند. تبادل حرارت بین هوای سرد و هوای گرم می‌تواند دمای محفظه را کاهش دهد. سپس هوای گرم از طریق یک فن خروجی هوا تخلیه می‌شود. تنها در صورتی که دمای داخل محفظه ایستگاه پایه بسیار زیاد شود و از حد معینی فراتر رود، کنترل کننده هوشمند کولر گازی را برای خنک کردن اتاق روشن می‌کند. وارد کردن هوای سرد طبیعی از فضای باز به داخل محفظه می‌تواند به طور مؤثر از یک منبع سرمای طبیعی استفاده کند، بنابراین زمان فعالیت کولر گازی در محفظه را کاهش و در نتیجه از مصرف انرژی بخش تهویه کاسته می‌شود. این روش همچنین طول عمر کمپرسور کولر گازی را افزایش می‌دهد که همین امر منجر به کاهش هزینه عملیاتی اپراتور می‌شود.

در روش کلاسیک برای سرمایش سایت‌ها از کولرهای گازی استفاده می‌شود. کولرهایی گازی که علاوه بر اینکه سال به سال دچار کاهش بازده و کارایی می‌شوند، مصرف انرژی بسیار بالایی نیز دارند و فراهم کردن این انرژی توسط سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر منجر به افزایش سرسام‌آور کل هزینه پیاده‌سازی خواهند شد. به همین منظور، استفاده از روش‌هایی برای کاهش مصرف انرژی بار بخش سرمایشی از اولویت بالایی برخوردار است. در این بخش به بررسی انواع روش‌های بهینه‌سازی مصرف سیستم‌های سرمایشی ایستگاه‌های پایه پرداخته شده است و در ادامه اثر استفاده از این نوع سیستم‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است. به طور کلی سیستم‌های هوشمند سرمایشی سایت را می‌توان به سه دسته کلی سیستم تهویه هوای هوشمند^{۱۵}، سیستم تبادل حرارتی هوشمند^{۱۶} و سیستم تبادل حرارتی لوله‌ای^{۱۷} تقسیم کرد [۱۰]. در سیستم تهویه هوای هوشمند، یک کنترل کننده وجود

جدول ۴: مقایسه استفاده از سیستم‌های سرمایشی هوشمند

نوع سیستم	موارد استفاده	میزان کاهش مصرف انرژی بخش سرمایشی (%)	بار بخش سرمایشی (kWh)	ظرفیت پنل‌ها (kW)	تعداد باتری‌ها (عدد)	ظرفیت اینورتر (kW)	هزینه اولیه سرمایه‌گذاری (دلار)	هزینه جایگزینی سیستم (دلار)	NPC (دلار)
سیستم سرمایشی عادی	همه مناطق	--	۳۶	۳۳٫۲	۳۲	۴	۲۴۶۴۷	--	۳۶۰۳۹
سیستم تهویه هوای هوشمند	- سایت‌های با اختلاف دمای داخلی و بیرونی زیاد - دور از کارخانه‌ها و ریزگردها و مناطق بیابانی	۲۰-۳۰	۲۵٫۲	۲۶٫۸	۳۲	۳	۲۲۰۱۰	۵۰۰-۱۰۰۰	۳۲۷۵۳
سیستم تبادل حرارتی هوشمند	- سایت‌هایی با اختلاف دمای داخلی و بیرونی زیاد - سایت‌هایی در مناطق کوهستانی و معتدل	۳۰-۴۰	۲۱٫۶	۲۵٫۲	۳۲	۳	۲۱۴۰۰	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۳۲۰۳۴
سیستم تبادل حرارتی لوله‌ای	- سایت‌هایی با اختلاف دمای داخلی و بیرونی زیاد - سایت‌هایی در مناطق کوهستانی و معتدل	۵۰>	۱۸	۲۳٫۶	۳۲	۲	۲۹۱۱۶	۲۰۰۰-۲۵۰۰	۳۱۶۱۶

^{۱۷} Smart Heat Pipe System

^{۱۵} Smart Outside Air Ventilation System

^{۱۶} Smart Heat Exchange System

مجدداً با حل مسئله بهینه‌سازی به دست آمد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده توأم از این سه راهکار بهره‌وری انرژی می‌تواند مصرف انرژی ایستگاه پایه را از ۸۴ کیلووات ساعت در روز به ۴۳ کیلووات در روز کاهش دهد. این امر منجر به کاهش قابل توجه ظرفیت نامی صفحات خورشیدی مورد نیاز از ۳۳ به ۲۲ کیلووات می‌شود. همچنین تعداد باتری‌ها نیز کاهش محسوسی دارد. نتایج این مقاله نشان می‌دهد استفاده همزمان از سازوکارهای بهره‌وری انرژی منجر به کاهش تا ۵۰ درصدی در هزینه خالص پروژه در طول ۱۰ سال شده است. نتایج مطلوب این بهینه‌سازی در گام بعدی تحقیق، می‌بایست به صورت پایلوت (آزمایشی) در یک ایستگاه پایه نمونه اجرا شود و میزان اثربخشی راهکارها مورد ارزیابی قرار گیرد.

مراجع

- [1] K. Samdanis, P. Rost, A. Maeder, M. Meo and C. Verikoukis, "Green communications: Principles, concepts and practice", West Sussex, UK: Wiley, 2015.
- [2] GSAM, "Green Power for Mobile: Interactive Replication Guide", 2011.
- [3] GSMA, "Climate action handbook", 2019.
- [4] V. Chamola and B. Sikdar, "Solar powered cellular base stations: current scenario, issues and proposed solutions", *IEEE Communication Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 108-114, 2016.
- [5] K. Komiya, S. Seki and K. Takeno, "Environmentally-friendly disaster-resistant green base station test system", *NTT Docomo Technical Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 35-41, 2013.
- [6] Orange, "Integrated annual report", 2020.
- [7] GSMA, "Green power for mobile – Biannual report", 2014.
- [8] M. H. Alsharif, "Comparative analysis of solar-powered base stations for green mobile networks." *Energies*, vol. 10, no. 8, pp. 1-25, 2017.
- [9] A. Jahid et al, "Techno-Economic and energy efficiency analysis of optimal power supply solutions for green cellular base stations," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 43776-43795, 2020.
- [10] ITU, "ITU-T Recommendation L.1380: Smart energy solution for telecom sites," 2019.
- [11] 3GPP, "TS 32.551: Telecommunication management: Energy Saving Management (ESM); Concepts and requirements," Release 16, 2020.
- [12] F. A. Farret and M. Godoy Simoes, *Integration of Alternative Sources of Energy*, Wiley, 2006.
- [13] G. Auer et al, "How much energy is needed to run a wireless network?," *IEEE Communication Magazine*, vol. 18, no. 5, pp. 40-49, 2011.
- [14] LEXNET project, "Low EMF Exposure Future Network – D3.3: Exposure index assessment," 2014.
- [15] ITU, "ITU-T Recommendation L.1351: Energy efficiency measurement methodology for base station sites," 2018.

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد در صورت استفاده از سیستم‌های هوشمند سرمایه‌گذاری برای ایستگاه‌های پایه، میزان مصرف انرژی بخش سرمایه‌گذاری ۲۰ تا بیش از ۵۰ درصد وابسته به منطقه جغرافیایی و وضعیت آب و هوایی کاهش پیدا خواهد کرد [۲]. برای مناطق گرم و خشک که دمای داخلی و بیرونی اختلاف چندانی ندارند، استفاده از سیستم‌های هوشمند توصیه نمی‌شود. همچنین استفاده از سیستم تهویه هوای هوشمند برای مناطق بیابانی که دارای ریزگردهای زیادی هستند، مناسب نیست. در این بخش اثر کاهش مصرف انرژی بخش سرمایه‌گذاری متناسب با منطقه جغرافیایی بررسی شده است. جدول ۴ نتایج تحلیل حساسیت استفاده از سیستم‌های سرمایه‌گذاری هوشمند با تکنولوژی‌های مختلف را نشان می‌دهد. پیاده‌سازی این نوع سیستم‌ها در صورت عدم وجود محدودیت اقلیمی، علاوه بر تأثیر مثبت در کاهش مصرف انرژی ایستگاه پایه و در نتیجه کاهش ظرفیت صفحات خورشیدی، باعث انتخاب اینورتر با ظرفیت کوچکتر و به تبع آن کاهش تلفات و هزینه شده است.

۵- نتیجه‌گیری

کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی سیستم تأمین برق خورشیدی، سبب می‌شود اجرای آن برای ایستگاه‌های پایه منفصل از شبکه برق، مقرون به صرفه شود. در این مقاله ظرفیت بهینه صفحات خورشیدی و باتری‌ها برای تأمین برق ایستگاه‌های پایه مخابرات موبایل انجام گرفت. برای این منظور، انرژی مصرفی ایستگاه پایه مستقر در مناطق روستایی و بین شهری با توجه به نسل سرویس مخابرات موبایل در طول عمر پروژه (۱۰ سال) انجام شد. سپس با توجه به تابش متوسط خورشید در یک منطقه مشخص، ظرفیت صفحات خورشیدی و باتری‌ها از حل مسئله بهینه‌سازی اقتصادی با نرم‌افزار HOMER به دست آمد.

سه راهکار بهره‌وری انرژی (سازوکار خواب سلول، به‌روزرسانی تقویت‌کننده توان در فرستنده مخابراتی، و ارتقای سیستم سرمایه‌گذاری) در ایستگاه پایه اجرا شد و پروفایل مصرف انرژی ایستگاه متناظراً اصلاح گردید. سپس ظرفیت بهینه صفحات خورشیدی و باتری‌ها