

ارزیابی تأمین برق BTS با استفاده از سیستم فتوولتائیک

فرشاد خاوری^۱، معین شیرازی^۲

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۲/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۳/۳/۱۷

چکیده:

این مقاله به امکان‌سنجی استفاده از سیستم فتوولتائیک در صنعت مخابرات برای تأمین برق مصرفی BTSها می‌پردازد. شرکت مخابرات برای افزایش دامنه پوشش تلفن‌های همراه نیازمند نصب BTS در مناطق مختلف است و تأمین برق مصرفی BTS، در مناطق دور از شبکه برق از مشکلات پیش رو در توسعه شبکه مخابراتی است. در این مقاله ابتدا راه‌های تأمین انرژی مورد نیاز BTS معرفی شده و سپس اقلیم آب و هوایی یک منطقه خاص در نظر گرفته شده و بر مبنای آن سیستم فتوولتائیک مورد نیاز با توجه به بار مصرفی BTS طراحی شده است. در ادامه، سیستم طراحی شده در چند سناریوی مختلف توسط نرم‌افزار HOMER شبیه‌سازی و از نظر اقتصادی با سایر تأمین‌کننده‌های انرژی نظیر دیزل ژنراتور و شبکه برق سراسری مقایسه گردیده است.

کلمات کلیدی:

سیستم فتوولتائیک، دیزل ژنراتور، شبکه سراسری برق، مطالعه امکان‌سنجی، BTS

farshad_khavari@yahoo.com
mn_shrz@yahoo.com

(۱) کارشناس جهاد دانشگاهی صنعتی شریف (نویسنده مسئول)
(۲) کارشناس جهاد دانشگاهی صنعتی شریف

مقدمه

برای دریافت امواج از شبکه‌های ارتباطی و ارسال آن به گوشی‌های تلفن همراه نیاز به نصب آنتن‌هایی است که آنها را BTS^۱ می‌نامند. یک BTS اولین بخشی است که مستقیماً با گوشی تلفن همراه در ارتباط است. هدف از نصب آنتن‌های BTS، تأمین پوشش رادیویی در جاده‌ها یا مناطق با سیگنال ضعیف و از بین بردن ترافیک شبکه است.

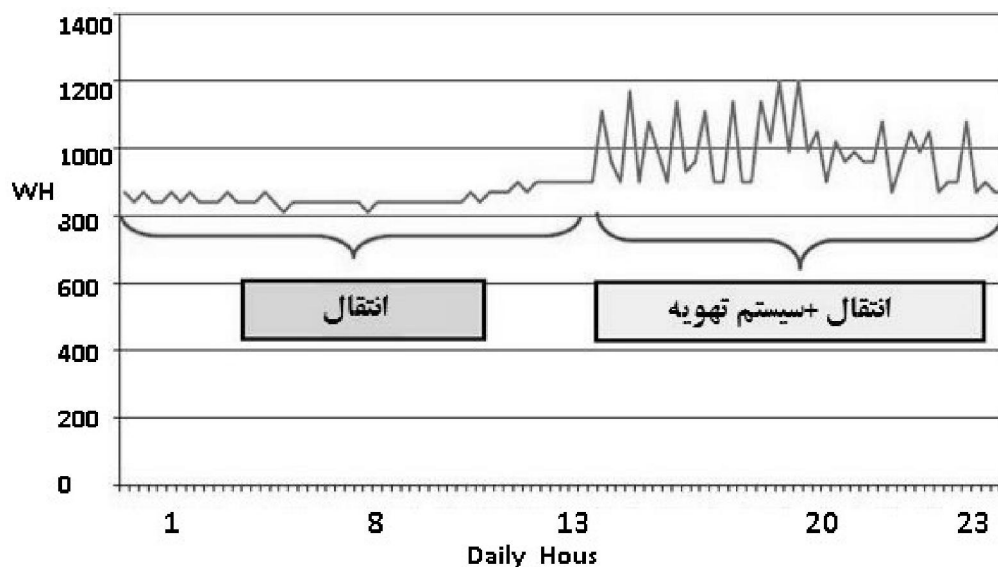
یافتن راه حلی مطمئن و اقتصادی برای تأمین برق مصرفی BTS‌های نصب شده در مناطق روستایی و دور از شبکه برق تبدیل به چالشی برای اپراتورهای تلفن همراه شده است. لذا بررسی گزینه‌های موجود برای تأمین برق مصرفی BTS، در صنعت مخابرات حیاتی جلوه می‌کند. اخیراً استفاده از فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر مانند سیستم‌های بادی، فتوولتائیک و ترکیبی باد و فتوولتائیک با توجه به دسترسی آسان، پایان‌ناپذیر بودن و عدم تولید آلودگی این منابع طبیعی برای تأمین برق در مناطق دور از شبکه برق به طرز چشمگیری افزایش یافته است. بالا بودن هزینه اولیه در فناوری انرژی تجدیدپذیر، سدی در برابر توسعه این سیستم‌هاست [۸] و [۲].

این مقاله شامل چهار بخش است: در بخش اول، گزینه‌های موجود برای تأمین برق سایت BTS معرفی می‌شود. در بخش دوم، بر اساس بار الکتریکی مصرفی BTS و اقلیم آب و هوایی منطقه مورد بررسی، سایزینگ اجزای سیستم فتوولتائیک انجام شده و سپس در بخش سوم، سیستم فتوولتائیک طراحی شده از نظر اقتصادی با دیگر گزینه‌های موجود برای تأمین برق مقایسه می‌گردد و در نهایت، بخش چهارم به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

روش‌های تأمین برق BTS

میزان برق مصرفی سالانه یک سیستم BTS، ۳۵/۵۰۰ کیلووات ساعت است. این عدد برابر با میانگین مصرف برق ۱۰ خانواده ایتالیایی در سال است. با توجه به اینکه تعداد آنتن‌های BTS در ایتالیا (در سال ۲۰۰۷)، ۶۰۰۰ واحد بوده است، متوسط برق مصرفی سالانه کل BTS‌ها ۲۱/۰ تریلیون وات ساعت تخمین زده شده که معادل ۰/۶ درصد برق مصرفی ایتالیا است. از منظر اقتصادی و زیست محیطی، این امر منجر به ۳۰۰ میلیون یورو هزینه برق و انتشار سالانه ۱/۲ میلیون تن دی‌اکسید کربن در هوا می‌شود [۸]. پروفایل مصرف برق روزانه یک BTS در شکل (۱) نشان داده است. همان طور که در شکل مشخص است، توان مصرفی برای انتقال اطلاعات در BTS در طول شبانه روز تقریباً ثابت و برابر ۸۰۰ وات است. بخش اول نمودار مربوط به عملکرد انتقال اطلاعات است. در ساعات گرم روز، مصرف سیستم تهویه نیز به عملکرد انتقال اضافه می‌شود. بخش دوم نمودار به این امر اشاره دارد. نوسان‌های شدید مشاهده شده در بخش دوم نمودار به دلیل کلدزنی سیستم تهویه است. لازم به ذکر است که مصرف برق BTS در فصل تابستان بیشتر از فصل زمستان خواهد بود.

1) Base Transceiver Station



شکل (۱) پروفایل مصرف برق روزانه یک BTS [۱]

در این بخش به سه روش رایج برای تأمین برق مورد نیاز BTS اشاره شده است که عبارتند از: شبکه سراسری برق، دیزل ژنراتور، انرژی‌های تجدید پذیر. برای واحدهایی‌های که در نزدیکی خطوط توزیع و فوق توزیع قرار دارند، تأمین برق سایت از طریق برق شبکه نیاز به توسعه شبکه تا محل مورد نظر و استفاده از ترانس ۴۰۰ به ۲۰ کیلو ولت و نیز یک یکسوکننده است. از مزایای این روش می‌توان به پایداری و بالا بودن قابلیت اطمینان سیستم (در صورت پایدار بودن شبکه برق و کم بودن دفعات قطع برق در محل مورد نظر) اشاره کرد. از معایب این روش، سختی اجرا و هزینه‌های بالای آن برای مناطق صعب‌العبور است. از منظر پدافند غیرعامل نیز وابستگی به شبکه سراسری برق، امتیازی منفی تلقی می‌گردد.

روش دوم برای تأمین برق BTS در مناطق دور از شبکه، استفاده از دیزل ژنراتور است. مهمترین مشکل بکارگیری دیزل ژنراتور، تأمین سوخت مصرفی آن است. همچنین سرقت ادوات دیزل، مشکلات سوخت‌رسانی در مناطق صعب‌العبور و نیز قابلیت اشتعال بالای گازوییل از دیگر معایب استفاده از این روش است. شکل (۲) نمایی از بکارگیری دیزل ژنراتور برای تأمین برق BTS را نشان می‌دهد.

در روش سوم برای تأمین برق مصرفی مانند روش قبل، تولید برق در محل سایت است. با توجه به کم بودن بار مصرفی، استفاده از منابع انرژی نو نظیر نیروگاه‌های کوچک باد و خورشید، راه حلی منطقی برای تأمین برق است. با توجه به پتانسیل انرژی باد و خورشید در محل سایت، توربین‌های بادی یا ماژول‌های فتوولتائیک و یا حتی نیروگاه ترکیبی بادی و خورشیدی می‌تواند برای تأمین برق مورد استفاده قرار گیرد. با وجود اینکه این روش از منظر پدافند غیرعامل، نسبت به سایر روشهای پیشین برتری دارد، ولی سرمایه‌گذاری اولیه و حفاظت از تجهیزات در برابر دستکاری و سرقت از معایب

بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر است. شکل (۳) نمایی از بکارگیری سیستم فتوولتائیک برای تأمین برق BTS را نشان می‌دهد.



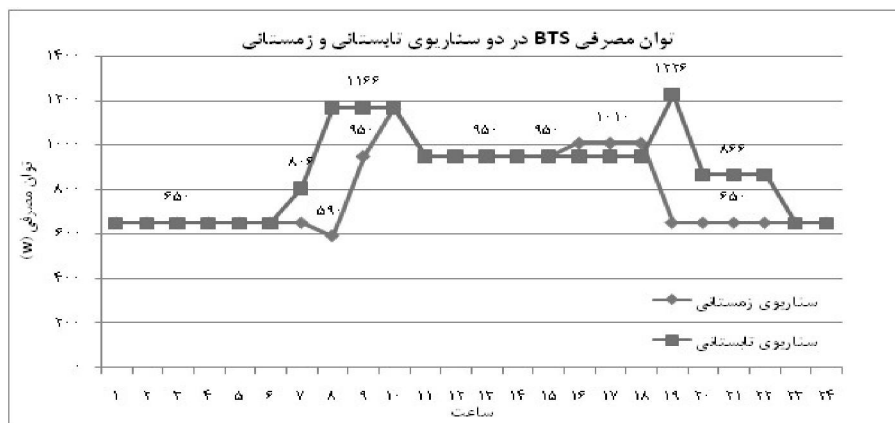
شکل ۲) بکارگیری دیزل ژنراتور برای تأمین برق BTS شکل ۳) بکارگیری سیستم فتوولتائیک برای تأمین برق BTS

سایزینگ اجزای نیروگاه فتوولتائیک

داده‌های هواشناسی استفاده شده در این مقاله استخراجی از داده‌های هواشناسی کشور و به طور نمونه برای شهر بم است. میانگین تابش خورشید در شهرستان بم، $5/43 \text{ KWh/m}^2$ برای هر روز است. در طراحی سیستم فتوولتائیک، الزامات استاندارد مشخصات فنی سلول‌های خورشیدی (تهیه شده توسط شرکت ارتباطات سیار) استفاده شده است. ولتاژ کاری همه اجزای مصرف‌کننده برق در سیستم BTS، ۴۸ ولت DC است. در این بخش علاوه بر معرفی اجزای سیستم فتوولتائیک، به سایزینگ اجزای اصلی سیستم نیز پرداخته می‌شود [۳].

مهمترین اجزای سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه برای تأمین برق DC مورد نیاز تجهیزات BTS، ماژول فتوولتائیک، جعبه اتصالات، شارژکنترلر مجهز به ردياب توان بیشینه، باتری و پایه ماژول هستند. با توجه به اینکه فاصله زمان‌های بازدید و بازرسی سایت طولانی است، استفاده از ردياب خورشیدی برای این سایت توصیه نمی‌شود. در ادامه، به سایزینگ واحد خورشیدی نصب شده، بانک باتری و شارژکنترلر پرداخته می‌شود.

تخمین بار مصرفی: اولین گام در طراحی سیستم‌های فتوولتائیک، تخمین برق مصرفی بار به صورت روزانه و ماهانه است. پروفایل بار مصرفی یکی از پارامترهای تعیین‌کننده ظرفیت اجزای سیستم فتوولتائیک است. بار مصرفی برای یک BTS نوعی و پروفایل مصرف برق BTS در دو سناریوی تابستانی (ماه‌های بهار و تابستان) و زمستانی (ماه‌های پاییز و زمستان) در جدول (۱) ارائه شده است. نمودار برق مصرفی روزانه BTS در سناریوی تابستانی و زمستانی در شکل (۴) نشان داده شده است. ولتاژ کاری کلیه مصرف‌کننده‌های الکتریکی سیستم ۴۸ ولت است. انرژی مصرفی روزانه BTS در سناریوی تابستانی، $20/928$ وات ساعت و در سناریوی زمستانی $18/936$ وات ساعت است.



شکل ۴) نمودار برق مصرفی روزانه یک نوعی در دو سناریوی تابستانی و زمستانی

سایزینگ باتری: استفاده از یک واحد ذخیره‌ساز به منظور ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی و تأمین پیوسته بار در طول شبانه‌روز ضروری است. به طور معمول، از باتری‌های سربی اسیدی^۱ به عنوان واحد ذخیره سیستم خورشیدی استفاده می‌شود. سه فرض زیر در سایزینگ باتری در نظر گرفته شده است: تعداد ساعات ابری متوالی، ۲ روز فرض شده است. میزان مجاز دشارژ باتری تا ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است. ضریب دمایی باتری و ضریب استهلاک باتری بترتیب ۱/۱ و ۱/۲۵ در نظر گرفته شده است. انرژی مصرفی سایت در دو روز متوالی، ۴۱/۸۵۶ وات ساعت (۸۷۲ آمپرساعت) است و در نتیجه ظرفیت باطری لازم با در نظر گرفتن ضریب دمایی، استهلاک باتری و ظرفیت کل باتری ۱۵۰۰ آمپرساعت در نظر گرفته شده است.

جدول ۱) توان مصرفی تجهیزات BTS در دو سناریوی تابستانی و زمستانی

اجزای سایت	توان مصرفی (w)	دوره کار روزانه در سناریوی زمستانی (%)	دوره کار روزانه در سناریوی تابستانی (%)
تجهیزات مخابراتی	۵۲۰	۱۰۰	۱۰۰
شارژ کنترلر	۱۵	۱۰۰	۱۰۰
تهویه مطبوع اتاق تجهیزات	۳۶۰	۴۱,۷	۵۰
تهویه مطبوع اتاق باتری	۲۱۶	۴۱,۷	۳۳
بادبزن مکنده اتاق باتری	۳۰	۱۰۰	۱۰۰
روشنایی	۶۰	۶۶	۵۰
بار متفرقه	۲۵	۱۰۰	۱۰۰

1) Lead acid

سایزینگ آرایه خورشیدی: با فرض لزوم تأمین پیوسته بار، ظرفیت آرایه خورشیدی به گونه ای انتخاب می شود که واحد خورشیدی در ۱۰ روز آفتابی متوالی بعد از ۲ روز ابری متوالی، توانایی شارژ کامل باتری علاوه بر تأمین بار را داشته باشد.

شش فرض زیر در سایزینگ واحد فتوولتائیک در نظر گرفته شده است:

فرض اول) معمولاً بعد از دو روز ابری متوالی، حداقل ۱۰ روز آفتابی متوالی وجود دارد.

فرض دوم) ساعات آفتابی روز ۵ ساعت فرض می شود.

فرض سوم) ضریب بازده شارژ باتری ۱/۱۵ فرض می شود.

فرض چهارم) ضریب اثر تمیزی ماژول بر بازده آن، ۱/۲ فرض می شود.

فرض پنجم) ضریب اثر افزایش عمر ماژول بر بازده آن ۱/۱ فرض می شود.

فرض ششم) ضریب افزایش بار مصرفی در آینده نیز، ۱/۱ فرض می شود.

آمپرلازم برای شارژ باتری از ۲۰ درصد تا ۱۰۰ درصد ظرفیت نامی در روزهای آفتابی متوالی از رابطه (۱) محاسبه می شود. با اعمال فرض های اول، دوم و سوم، صورت این رابطه حاصلضرب آمپرساعتی که باتری بایستی شارژ شود در ضریب بازده بوده و مخرج آن مدت زمان شارژ را مشخص می کند:

$$\text{جریان شارژ باتری از } ۲۰ \text{ درصد تا } ۱۰۰ \text{ درصد ظرفیت} = \frac{0.8 \times 1500Ah \times 1.15}{10 \times 5h} = 27.6A \quad (1)$$

آمپر-ساعت مورد نیاز برای تأمین بار و نیز شارژ باتری و نهایتاً مجموع آمپر-ساعت در طول شبانه روز برای تأمین بار و شارژ باتری برای سناریوی تابستانی بترتیب برابر ۴۳۶، ۱۳۸ و ۵۷۴ آمپرساعت قابل محاسبه است. با در نظر گرفتن اثر تمیزی و عمر ماژول بر روی بازده آن و لحاظ کردن افزایش احتمالی بار مصرفی در آینده، آرایه فتوولتائیک باید قادر باشد انرژی متناسب با آمپرساعت مطابق با رابطه (۲) را در یک روز جذب کند: آمپرساعت متناسب با انرژی تأمین شونده توسط آرایه فتوولتائیک در طول روز در سناریوی تابستانی در ولتاژ ۴۸ ولت با اعمال فرض های چهارم، پنجم و ششم به صورت رابطه (۲) می باشد.

$$= 574 \times 1.1 \times 1.2 \times 1.1 = 833.448Ah \quad (2)$$

در نتیجه، با توجه به مدت زمان ساعات آفتابی روز، آرایه فتوولتائیک باید قادر به تأمین ۴۰۰۵ Wh در ساعات آفتابی باشد. به منظور کاهش تعداد ماژول ها و در نتیجه کاهش متعلقات و در نتیجه کاهش هزینه تعمیر و نگهداری، مساحت

اشغال شده کمتر و آسان تر کردن عیب‌یابی ماژول‌ها، از ماژول‌های با توان بالاتر موجود در بازار استفاده می‌گردد. ماژول پیشنهادی TSM-180DA01 محصول شرکت Trina solar است. مشخصات این ماژول در شرایط آزمون استاندارد در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲) مشخصات ماژول فتوولتائیک استفاده شده

۱۸۰	توان بیشینه (W)
۲۴	ولتاژ در توان بیشینه (V)
۴/۹	جریان در توان بیشینه (A)
۴۴/۲	ولتاژ مدار باز (V)
۵/۳۵	جریان اتصال کوتاه (A)

تعداد رشته‌های موازی با توجه به جریان تأمین هر رشته در شرایط استاندارد (A ۴/۹)، رشته تعیین می‌گردد. با توجه به ولتاژ شارژ کنترلر، ۲ ماژول در هر رشته قرار می‌گیرد. بنابراین، ماژول‌ها به صورت 2×22 آرایش می‌یابند و ظرفیت آرایه فتوولتائیک ۷۹۲۰ وات محاسبه می‌گردد.

سایزینگ شارژ کنترلر: جریان نامی شارژ کنترلر با توجه به رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\text{ضریب تصحیح} \times (\text{جریان پیک بار در سناریوی تابستانی} + \text{جریان شارژ}) = \text{جریان نامی شارژ کنترلر} \quad (3)$$

$$58.454A = 1.1 \times (25.54 + 27.6) = \text{باتری از } 20 \text{ تا } 100 \text{ درصد جریان نامی}$$

شارژ کنترلر انتخابی (FLEX-max 60) جریان نامی A ۶۰ در ولتاژ ۴۸ ولت را دارد. همچنین این شارژ کنترلر مجهز به ردیاب توان بیشینه است.

شبیه‌سازی

این قسمت به شبیه‌سازی و بررسی فنی و اقتصادی سیستم تأمین برق BTS با استفاده از نرم‌افزار HOMER پرداخته و امکان‌سنجی استفاده از سیستم فتوولتائیک برای تأمین برق BTS در دو حالت مختلف مورد بررسی قرار داده است. در حالت اول، استفاده از دیزل ژنراتور و سیستم فتوولتائیک برای تولید برق در منطقه‌ای خارج از دسترس شبکه برق مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در حالت دوم، تأمین برق به وسیله شبکه سراسری برق و سیستم فتوولتائیک بررسی می‌شود. ظرفیت ماژول‌های فتوولتائیک رشته‌های در نظر گرفته شده برای بررسی توسط نرم‌افزار، ۰، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ کیلووات است. مشخصات واحد فتوولتائیک در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳) مشخصات واحد فتوولتائیک

۶۰۰۰	هزینه اولیه (\$)	هزینه برای هر کیلووات ظرفیت واحد خورشیدی نصب شده
۵۰۰۰	هزینه تعویض (\$)	
۰	هزینه تعمیر و نگهداری (\$/Year)	
۲۵ سال	عمر سیستم	مشخصات واحد فتوولتائیک
۸۰	ضریب استهلاک	
۳۰	شیب (درجه)	
۰	سمت الرأس (درجه)	
۲۰	بازتاب زمین (%)	
-۰/۵	ضریب دما (%/°C)	
۴۷	دمای نامی کار سلول (°C)	
۱۳	بازده سلول (%)	

در جدول (۳) منظور از هزینه جایگذاری، هزینه‌ای است که سرمایه‌گذار در صورت تعویض کامل سیستم فتوولتائیک (به دلیل پایان عمر مفید تجهیزات الکتریکی سیستم نظیر پنل، اینورتر) باید بپردازد. از آنجا که دوره سود آوری برخی طرح‌ها ممکن است بیش از طول عمر تجهیزات مصرفی سیستم باشد، این عامل در نظر گرفته می‌شود. در سیستم فتوولتائیک هزینه‌های عملیات زیر بنایی (مانند زیرسازی محل نصب سیستم و سازه‌های مکانیکی نصب پنل) تنها در یک دوره محاسبه می‌شود و این امر باعث می‌شود طرحی که در یک دوره اقتصادی به نظر نرسد، در دوره‌های بعد اقتصادی باشد. همچنین ضریب دما نشاندهنده مقدار وابستگی توان خروجی آرایه فتوولتائیک نسبت به دما می‌باشد [۴].

باتری مورد استفاده در شبیه‌سازی، USB US-250 (۶ ولت و ۲۵۰ آمپر ساعت) می‌باشد. در هر رشته، ۸ باتری سری شده و عمر کمینه باتری ۵ سال در نظر گرفته شده است. تعداد رشته‌های در نظر گرفته شده برای بررسی توسط نرم‌افزار ۰، ۲، ۵ و ۶ است. جدول (۴) هزینه‌های واحد باطری را نشان می‌دهد.

جدول (۴) هزینه‌های هر واحد باتری USB US-250

تعداد	هزینه اولیه (\$)	هزینه تعویض (\$)	هزینه تعمیر و نگهداری (\$/Year)
۱	۱۵۰	۱۵۰	۱/۵

در محاسبات اقتصادی دوره عمر سیستم ۲۵ سال و نرخ تورم سالانه ۲۲ درصد در نظر گرفته شده است. مشخصات واحدهای فتوولتائیک در تمام حالت‌های شبیه‌سازی به قرار فوق است.

حالت اول مقایسه با دیزل ژنراتور: در این حالت دو سناریوی عملکردی برای دیزل ژنراتور در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، محدودیت عملکردی بر محدوده زمان کار دیزل ژنراتور اعمال می‌گردد و در سناریوی دوم، محدودیت زمان کار برای دیزل ژنراتور در نظر گرفته نمی‌شود. پارامترهای حساسیت سیستم قیمت گازوییل و میانگین شدت تابش سالانه خورشید در نظر گرفته می‌شوند. میانگین شدت تابش خورشیدی عاملی برای تعیین یا ارزیابی پتانسیل خورشیدی محل نصب است و قیمت گازوییل نیز پارامتر اصلی در تعیین قیمت برق تولیدی دیزل است. هزینه‌های یک دیزل ژنراتور به ازای

هر کیلووات ظرفیت تولید برق در جدول (۵) آمده است. ظرفیت‌های در نظر گرفته شده برای دیزل ژنراتور ۰ و ۵ کیلووات فرض شده است. قیمت گازوییل در این شبیه‌سازی بر اساس مرجع [۵]، از ۰/۸ تا ۳ دلار بر لیتر در نظر گرفته شده است.

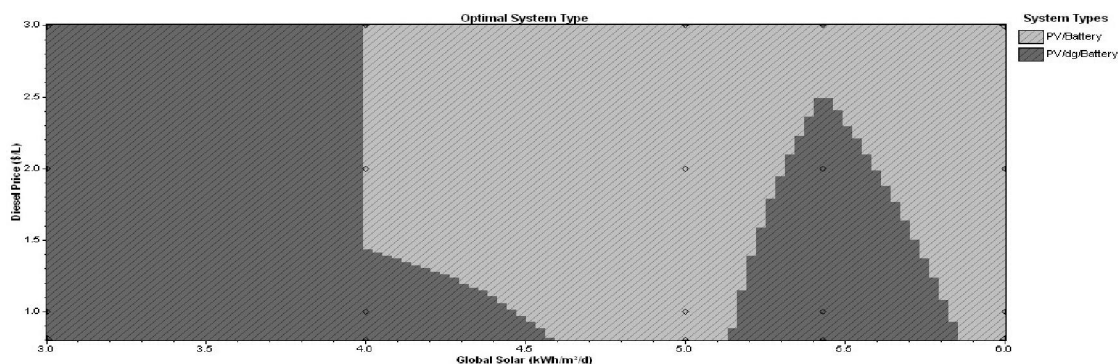
جدول (۵) مشخصات واحد دیزل ژنراتور

تعداد	هزینه اولیه (\$)	هزینه تعویض (\$)	هزینه تعمیر و نگهداری (\$/hour)
۱	۶۰۰	۵۰۰	۰/۲

حالت اول سناریوی اول (اعمال محدودیت برای کار دیزل ژنراتور): در این سناریو، دیزل ژنراتور در ساعات آفتابی روز خاموش است و تنها در بازه زمانی ۸ شب تا ۸ صبح مشغول به تولید است. جدول (۶) نتایج شبیه‌سازی سناریوی اول را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش قیمت گازوییل و نیز افزایش شدت تابش خورشیدی سبب اقتصادی شدن تأمین برق به وسیله برق خورشیدی نسبت به تأمین برق توسط دیزل ژنراتور می‌شود. برای شدت تابش $5/43 \text{ KWh/m}^2/\text{day}$ و حتی شدت تابش $4 \text{ KWh/m}^2/\text{day}$ تا وقتی که قیمت گازوییل بیشتر از ۰/۸ دلار برای هر لیتر باشد، استفاده از سیستم فتوولتائیک از نظر اقتصادی مقرون بصره‌تر از استفاده از دیزل ژنراتور است. برای شدت تابش $3 \text{ KWh/m}^2/\text{day}$ ، مستقل از قیمت گازوییل، استفاده از سیستم فتوولتائیک به تنهایی مقرون بصره نیست. شکل (۵) نمودار تحلیل حساسیت سناریوی اول را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشخص شده، در بازه شدت تابش ۴ تا $5 \text{ KWh/m}^2/\text{day}$ استفاده از فتوولتائیک به تنهایی حتی با در نظر گرفتن قیمت ۰/۸ دلار برای هر لیتر گازوییل باز هم مناسب‌ترین روش ارزیابی می‌شود (این مسئله با رنگ روشن در شکل (۵) مشخص شده است).

جدول (۶) خلاصه‌ای از نتایج شبیه‌سازی حالت اول سناریوی اول مقایسه با دیزل ژنراتور

حالت‌های طراحی	پارامترهای حساسیت		اجزای سیستم تأمین برق			هزینه‌های سیستم			مدت زمان تغذیه پیوسته مستقل به وسیله باتری (ساعت)	سهم انرژی نو در تأمین برق (%)
	میانگین سالانه تابش خورشیدی ($\text{KWh/m}^2/\text{d}$)	قیمت گازوییل ($\$/\text{L}$)	آرایه خورشیدی (KW)	باتری (USB US-250)	دیزل ژنراتور (KW)	هزینه نه‌به‌نه برادری ($\$/\text{year}$)	هزینه تراز شده انرژی ($\$/\text{KWh}$)	مجموع هزینه خاص قبلی ($\$/\text{year}$)		
۱	۵/۴۳	۳	۶	۴۰ عدد	۰	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶،۴۶۲	۴۳/۴	۱۰۰
۲	۵/۴۳	۲	۶	۴۰ عدد	۰	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶،۴۶۲	۴۳/۴	۱۰۰
۳	۵/۴۳	۱	۶	۴۰ عدد	۰	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶،۴۶۲	۴۳/۴	۱۰۰
۴	۵/۴۳	۰/۸	۵	۴۰ عدد	۵	۱۰۰۹۶	۱/۴۱۷	۴۶،۴۴۵	۴۳/۴	۹۷
۵	۴	۳	۷	۴۸ عدد	۰	۷۷۸	۱/۶۳۹	۵۳،۷۱۱	۵۲/۱	۱۰۰
۶	۴	۲	۷	۴۸ عدد	۰	۷۷۸	۱/۶۳۹	۵۳،۷۱۱	۵۲/۱	۱۰۰
۷	۴	۱	۷	۴۸ عدد	۰	۷۷۸	۱/۶۳۹	۵۳،۷۱۱	۵۲/۱	۱۰۰
۸	۴	۰/۸	۷	۴۸ عدد	۰	۷۷۸	۱/۶۳۹	۵۳،۷۱۱	۵۲/۱	۱۰۰

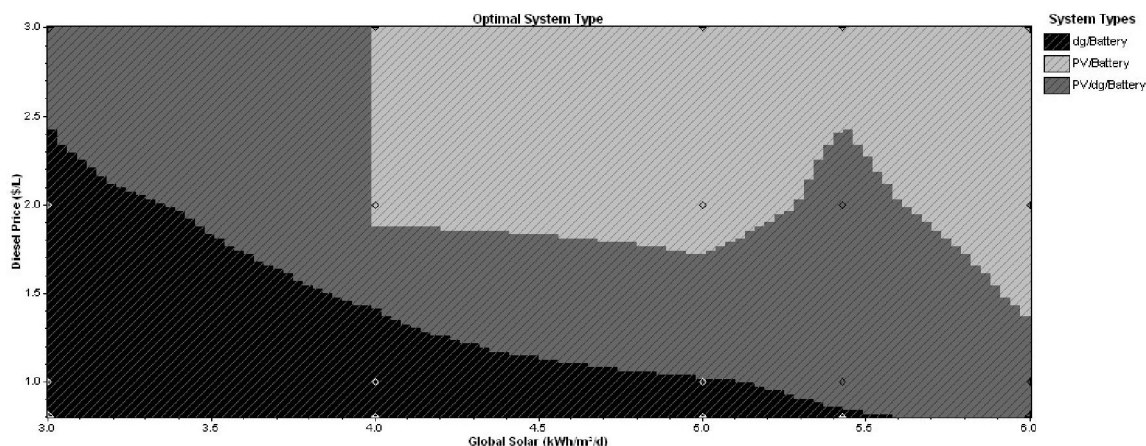


شکل ۵) نمودار تحلیل حساسیت در سناریو اول مقایسه با دیزل ژنراتور

حالت اول سناریوی دوم (عدم اعمال محدودیت برای کار دیزل ژنراتور): در این سناریو تنها محدودیت اعمالی بر دیزل ژنراتور، محدودیت‌های ناشی از بهینه‌سازی است و هیچگونه قیدی بر زمان کار دیزل ژنراتور اعمال نمی‌شود. جدول ۷ نتایج شبیه‌سازی سناریوی دوم را نشان می‌دهد. نمودار آنالیز حساسیت سناریوی دوم در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود استفاده از فتوولتائیک به تنهایی فقط زمانی که قیمت گازوییل بیش از ۲ دلار بر لیتر و شدت تابش بیشتر از $4 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ مناسب ارزیابی شده است (این مسئله با رنگ روشن در شکل ۶ مشخص شده است).

جدول ۷) خلاصه‌ای از نتایج شبیه‌سازی حالت اول سناریوی دوم مقایسه با دیزل ژنراتور

مدت زمان تغذیه پیوسته مستقل به وسیله باتری (ساعت)	سهم انرژی نو در تأمین برق (%)	هزینه های سیستم			اجزای سیستم تأمین برق			پارامترهای حساسیت		حالت‌های طراحی
		هزینه بهره برداری (\$/year)	هزینه تراز شده انرژی (\$/kWh)	مجموع هزینه خاص فنی (\$) (\$)	دیزل ژنراتور (KW)	باتری (USB US- (250	آرایه خورشیدی (KW)	قیمت گازوییل (\$/L)	متوسط سالانه تابش خورشیدی (kWh/m ² /d)	
۴۳/۴	۱۰۰	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶,۴۶۲	۰	عدد ۴۰	۶	۳	۵/۴۳	۱
۴۳/۴	۸۲	۲,۲۴۶	۱/۳۹۲	۴۵,۶۴۰	۵	عدد ۴۰	۴	۲	۵/۴۳	۲
۴۳/۴	۲۵	۳۹۶۴	۱/۲۶۳	۴۱,۳۹۵	۵	عدد ۴۰	۲	۱	۵/۴۳	۳
۴۳/۴	۰	۶۰۰۱	۱/۱۸۸	۳۸,۹۵۱	۵	عدد ۴۰	۰	۸/۰	۵/۴۳	۴
۵۲/۱	۱۰۰	۷۷۸	۱/۶۳۹	۵۳,۷۱۱	۰	عدد ۴۸	۷	۳	۴	۵
۵۲/۱	۱۰۰	۷۷۸	۱/۶۳۹	۵۳,۷۱۱	۰	عدد ۴۸	۷	۲	۴	۶
۴۳/۴	۰	۶۷۷۵	۱/۲۸۱	۴۱,۹۹۰	۵	عدد ۴۰	۰	۱	۴	۷
۴۳/۴	۰	۶۰۰۱	۱/۱۸۸	۳۸,۹۵۱	۵	عدد ۴۰	۰	۰/۸	۴	۸



شکل ۶) نمودار تحلیل حساسیت در سناریو دوم مقایسه با دیزل ژنراتور

حالت دوم: تأمین برق در منطقه تحت پوشش شبکه برق سراسری: در این حالت نیز دو سناریوی عملکردی برای شبکه برق سراسری در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، شبکه برق در دسترس فرض شده است و در سناریوی دوم، محدودیت دسترسی به شبکه سراسری در نظر گرفته شده است.

حالت دوم سناریوی اول (شبکه برق در دسترس): در این حالت، شدت تابش خورشید، قیمت خرید برق از شبکه و قیمت فروش برق به شبکه به عنوان پارامترهای حساسیت در نظر گرفته شده است. با توجه به مراجع [۶] و [۷]، هزینه برق خریداری شده ۰/۵۰ دلار برای هر کیلووات ساعت لحاظ شده است. (در این شبیه‌سازی بیشترین قیمت برای خرید برق از شبکه در نظر گرفته شده تا تفاوت هزینه تأمین برق از شبکه سراسری نسبت به احداث سیستم فتوولتائیک نمود پیدا کند.)

نتایج شبیه‌سازی این حالت در جدول (۸) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مساعدترین حالت برای استفاده از انرژی واحد فتوولتائیک، حالت ۵ است که در آن بالاترین شدت نور خورشید، بیشترین قیمت برای خرید برق از شبکه و فروش برق به شبکه در نظر گرفته شده است. حتی در این حالت نیز استفاده از برق شبکه بصره‌تر از استفاده از واحد فتوولتائیک یا ترکیب واحد فتوولتائیک و شبکه برای تأمین برق مصرفی BTS است.

جدول ۸) خلاصه‌ای از نتایج شبیه‌سازی حالت دوم سناریوی اول سیستم با شبکه برق در دسترس

سهم انرژی نو در تأمین برق (%)	هزینه های سیستم			اجزای سیستم تأمین برق			پارامترهای حساسیت			حالت‌های طراحی
	هزینه بهره برداری (\$/year)	هزینه تراز شده انرژی (\$/KWh)	مجموع هزینه خالص فعلی (\$)	شبکه برق (KW)	باتری (USB US-250)	آرایه خورشیدی (KW)	قیمت خرید برق از شبکه (\$/KWh)	قیمت فروش برق به شبکه (KWh/\$)	متوسط سالانه تابش خورشیدی (KWh/m ² /d)	
۰	۷۹۳	-/۱۸۵	۶۰۰۸۱	۱۰۰	۰	۰	-/۰۰۵	-/۰۰۴۳	۵/۴۳	۱
۰	۷۹۳	-/۱۸۵	۶۰۰۸۱	۱۰۰	۰	۰	-/۰۰۵	-/۰۰۸۷	۵/۴۳	۲
۰	۷۹۳	-/۱۸۵	۶۰۰۸۱	۱۰۰	۰	۰	-/۰۰۵	-/۰۱۲	۵/۴۳	۳
۰	۴۶۳۹	-/۷۱۵	۲۳،۴۳۹	۱۰۰	۰	۰	-/۰۰۵	-/۰۰۴۳	۵/۴۳	۴
۰	۴۶۳۹	-/۷۱۵	۲۳،۴۳۹	۱۰۰	۰	۰	-/۰۰۵	-/۰۰۸۷	۵/۴۳	۵
۰	۴۶۳۹	-/۷۱۵	۲۳،۴۳۹	۱۰۰	۰	۰	-/۰۰۵	-/۰۱۲	۵/۴۳	۶
۰	۷۹۳	-/۱۸۵	۶۰۰۸۱	۱۰۰	۰	۰	-/۰۰۵	-/۰۰۴۳	۴	۷
۰	۷۹۳	-/۱۸۵	۶۰۰۸۱	۱۰۰	۰	۰	-/۰۰۵	-/۰۰۸۷	۴	۸

حالت دوم سناریوی دوم (عدم دسترسی به شبکه برق و احداث خط): حال اگر شبکه سراسری از واحد BTS فاصله داشته باشد، یکی از راه‌حل‌های موجود برای تأمین برق مصرفی واحد BTS، در این مناطق دور دست از شبکه برق، گسترش شبکه تا محل مصرف است. در این قسمت به مقایسه اقتصادی دو روش گسترش شبکه توزیع تا محل مصرف و احداث سیستم فتوولتائیک برای تأمین برق پرداخته می‌شود. در شبیه‌سازی انجام شده در این بخش، هزینه احداث خطوط توزیع ۲۰۰۰، ۵۰۰۰، ۸۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۲۵۰۰۰ دلار برای هر کیلومتر در نظر گرفته شده است. هزینه تعمیر و نگهداری خط ۱۶۰ دلار در سال برای هر کیلومتر در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی مقایسه هزینه توسعه شبکه و احداث سیستم فتوولتائیک برای تأمین برق BTS در جدول (۹) آمده است. به عنوان نمونه، در حالت طراحی ۲، اگر فاصله واحد BTS از شبکه توزیع بیشتر از ۷/۸۳ کیلومتر باشد، احداث سیستم فتوولتائیک برای تأمین برق بصره‌تر از توسعه خط توزیع تا محل BTS است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، حتی اگر خط انتقالی با حداقل استانداردهای ممکن برای تأمین برق سایت احداث شود و طول این خط انتقال بیش از ۱۹/۱ کیلومتر باشد (حالت ۱۱)، استفاده از سیستم فتوولتائیک مقرون بصره‌تر خواهد بود.

جدول ۹) خلاصه‌ای از نتایج شبیه‌سازی حالت دوم سناریوی دوم توسعه شبکه برق و احداث سیستم فتوولتائیک

فاصله‌ای که در آن مجموع هزینه خالص فعلی توسعه خط انتقال برق و احداث واحد فتوولتائیک برابر می‌شود (Km)	هزینه های سیستم			اجزای سیستم تامین برق		پارامترهای حساسیت			حالت‌های طراحی
	هزینه بهره برداری (\$/year)	هزینه تراز شده انرژی (\$/KWh)	مجموع هزینه خالص فعلی (\$)	باتری (USB US-250)	آرایه خورشیدی (KW)	قیمت خرید برق از شبکه (\$/KWh)	هزینه احداث خط توزیع برق (\$/Km)	متوسط سالانه تابش خورشیدی (KWh/m2/d)	
۱۶/۵	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶,۴۶۲	۴۰ عدد	۶	-/۰.۵	۲,۰۰۰	۵/۴۳	۱
۷/۸۳	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶,۴۶۲	۴۰ عدد	۶	-/۰.۵	۵,۰۰۰	۵/۴۳	۲
۳/۵۲	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶,۴۶۲	۴۰ عدد	۶	-/۰.۵	۱۲,۰۰۰	۵/۴۳	۳
۲/۸۵	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶,۴۶۲	۴۰ عدد	۶	-/۰.۵	۱۵,۰۰۰	۵/۴۳	۴
۱/۷۴	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶,۴۶۲	۴۰ عدد	۶	-/۰.۵	۲۵,۰۰۰	۵/۴۳	۵
۱۵/۹	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶,۴۶۲	۴۰ عدد	۶	-/۱	۲,۰۰۰	۵/۴۳	۶
۷/۵۵	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶,۴۶۲	۴۰ عدد	۶	-/۱	۵,۰۰۰	۵/۴۳	۷
۳/۳۹	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶,۴۶۲	۴۰ عدد	۶	-/۱	۱۲,۰۰۰	۵/۴۳	۸
۲/۷۵	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶,۴۶۲	۴۰ عدد	۶	-/۱	۱۵,۰۰۰	۵/۴۳	۹
۱/۶۸	۷۶۷	۱/۴۱۷	۴۶,۴۶۲	۴۰ عدد	۶	-/۱	۲۵,۰۰۰	۵/۴۳	۱۰
۱۹/۱	۷۸۷	۱/۶۳۹	۵۳,۷۱۱	۴۸ عدد	۷	-/۰.۵	۲,۰۰۰	۴	۱۱

نتیجه گیری

با توجه به مطالعات صورت گرفته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی، در بهره‌گیری از منابع انرژی (شبکه سراسری، دیزل ژنراتور و سیستم فتوولتائیک) جهت تامین برق مورد نیاز واحدهای BTS پارامترهای گوناگونی تأثیرگذار خواهد بود. دلایلی که در این تحقیق باعث بهره‌گیری از سیستم فتوولتائیک جهت تامین انرژی واحدهای BTS شده است عبارتند از: بالا بودن هزینه توسعه شبکه برق؛ شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی مورد نمونه شهرستان بم نشان داده‌اند که چنانچه فاصله واحد از شبکه سراسری بیش از ۲۰ کیلومتر باشد، حتی حداقل استانداردهای موجود نیز نمی‌تواند طرح توسعه شبکه را نسبت به احداث سیستم فتوولتائیک از لحاظ اقتصادی توجیه نماید. بالا بودن قیمت گازوئیل و شدت تابش خورشیدی؛ اگر هزینه‌های سنگین حمل دیزل ژنراتور، آلودگی زیست محیطی، اشتغال زایی بالای گازوئیل و هزینه تعمیر نگهداری بالای

دیزل ژنراتور را قبول کنیم، باز هم نتایج این تحقیق حاکی از آن است که در تابش نور بیشتر از $4 \text{ KWh/m}^2/\text{day}$ و قیمت گازوییل بالاتر از $0/8$ دلار، استفاده از سیستم فتوولتائیک مقرون بصره‌تر خواهد بود. احداث واحد فتوولتائیک به منظور تأمین برق، بعضاً در مناطق صعب‌العبور، تنها راه تأمین برق مصرفی واحد BTS می‌باشد.

منابع

- [1] Lubritto, C. , Petraglia, A. , Vetromile, C. , Caterina, F. , D'Onofrio, A. , Logorelli, M. , Marsico, G. and Curcuruto, S. 2008. "Telecommunication Power System: energy saving, renewable sources and environmental monitoring" ,IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference, PP. 1-4.
- [2] George Koutitas and Panagiotis Demestichas. 2010. "A Review of Energy Efficiency in Telecommunication Networks", Telfor Journal, Vol.2, No.1.
- [3] <http://ecmweb.com/design/power-dc-rural-telecom-systems>.
- [4] <https://analysis.nrel.gov/homer/>, Last seen on 2012 Dec.
- [5] <http://www.mytravelcost.com/petrol-prices/>.
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_price.
- [7] <http://www.viwapa.vi/Home.aspx>.
- [8] Roy S. N. 2008. "Energy Logic: A Road Map to Reducing Energy Consumption in Telecommunications Networks" ,IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference, PP. 90-98.