

ارزیابی اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه در روستاها با شبیه‌سازی مونت کارلو (مطالعه موردی: تهران)

مهدی حاتمی^{1*}، علی ناظمی²، اعظم دولت‌آبادی³، مصطفی مصطفی‌پور⁴

تاریخ دریافت: 5 بهمن 1392 تاریخ پذیرش: 1 اردیبهشت 1393

چکیده

طبق آمار منتشره از سوی شرکت توانیر، علی‌رغم اتمام عملیات برق‌رسانی به روستاهای بیش از 20 خانوار ایران، هنوز بیش از 17000 خانوار روستایی که در روستاهایی با جمعیت کمتر از 20 خانوار ساکن‌اند، از نعمت دسترسی به برق محروم هستند. تلفات تولید، انتقال و توزیع برق و پراکندگی جمعیت کشور باعث شده که به استفاده از انرژی خورشید در مکان‌های دورافتاده توجه شود. در این میان، استفاده از سیستم فتوولتائیک، به دلیل تبدیل مستقیم انرژی خورشید به برق و نداشتن نیاز به تجهیزات پیچیده اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مقاله، به ارزیابی اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه، به جای توسعه شبکه برق سراسری در روستاهای تهران پرداخته شده و با توجه به عدم قطعیت‌های موجود برای مدل‌سازی، از شبیه‌سازی مونت کارلو با 2000 تکرار استفاده شده است. ارزیابی اقتصادی با توجه به هزینه چرخه عمر سیستم فتوولتائیک برای یک دوره بین 25 تا 30 سال و هزینه‌های توسعه شبکه برق سراسری برای روستاهای دورافتاده صورت گرفته است. نتایج این مقاله حداقل فاصله روستا از شبکه توزیع برق سراسری را نشان می‌دهد که در آن استفاده از سیستم فتوولتائیک نسبت به توسعه شبکه برق سراسری اقتصادی‌تر است. این فاصله با افزایش نرخ تنزیل نسبت عکس و با تعداد روز ابری متوالی و تعداد خانوار روستا نسبت مستقیم دارد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی اقتصادی، انرژی تجدیدپذیر، سیستم فتوولتائیک، شبیه‌سازی مونت کارلو، عدم

قطعیت.

1-دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب.

2-استادیار اقتصاد دانشگاه علوم اقتصادی.

3-دانش آموخته کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی دانشگاه پیام نور تهران.

4-دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه علوم اقتصادی.

(*- نویسنده مسئول: mehdiatami1000@gmail.com)

مقدمه

عواملی نظیر سهم بخش نیروگاهی در انتشار گازهای آلاینده، هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و پایان‌پذیر بودن این منابع انرژی، نبود شبکه برق سراسری در مناطق دورافتاده، هزینه گران احداث خط انتقال جدید به دلیل مسافت طولانی، افزایش نرخ مصرف انرژی برق و وجود تعداد زیادی مصرف‌کننده دور از هم، باعث توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و به خصوص سیستم فتوولتائیک شده است (کایشنگ و همکاران¹، 2008). استفاده از سیستم فتوولتائیک به دلیل هایی از قبیل راندمان بالا، منتشر نشدن گازهای آلاینده و ساختار انعطاف‌پذیر، پتانسیل بسیار زیادی در تبدیل به منابع انرژی سبز در آینده‌ای نزدیک خواهد داشت (باتاچاریا²، 2012).

با توجه به منافع استفاده از سیستم فتوولتائیک، پژوهش‌های مختلفی در کشور در خصوص ارزیابی اقتصادی استفاده از این سیستم در ایران انجام شده است. به عنوان نمونه، اسراری و همکاران³ (2012) با استفاده از نرم‌افزار هومر⁴ در روستای شیخ عبدالحسین ارزیابی اقتصادی انجام داده و نشان دادند که استفاده از سیستم تجدیدپذیر در کنار دیزلی، اقتصادی است. حسنی و همکاران (1390)، با استفاده از روش هزینه چرخه عمر⁵ سیستم فتوولتائیک برای اهواز ارزیابی اقتصادی انجام داده و به این نتیجه رسیده‌اند که استفاده از سیستم فتوولتائیک اقتصادی نیست. منشی‌پور و همکاران (1386) در ارزیابی اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک به جای توسعه شبکه برق سراسری در یک روستای 20 خانواری به این نتیجه رسیده‌اند که در فاصله‌های بیشتر از 22 کیلومتر از شبکه توزیع برق، استفاده از سیستم فتوولتائیک مقرون به صرفه است. بهادری نژاد و همکاران (1385) با محاسبه هزینه چرخه عمر سیستم فتوولتائیک به غیراقتصادی بودن استفاده از برق فتوولتائیک در تهران دست پیدا کرده‌اند. خوش اخلاق و همکاران (1383) با استفاده از روش هزینه چرخه عمر قیمت هر کیلووات ساعت برق فتوولتائیک را به دست آورده و به این نتیجه رسیده‌اند که برق فتوولتائیک برای روستای 20 خانواری با فاصله 5 کیلومتر از شبکه توزیع نسبت به برق تولیدی از سیستم دیزلی یا توسعه شبکه برق سراسری اقتصادی تر است.

با وجود انجام پژوهش‌های مختلف در ارتباط با ارزیابی این سیستم، در هیچ یک از پژوهش‌های انجام شده در کشور عدم قطعیت‌هایی که بر روی طراحی سیستم فتوولتائیک تأثیر می‌گذارند، در نظر گرفته نشده است.

1- Caisheng
2- Bhattacharyya
3- Asrari
4- Homer
5- Life cycle cost

در خارج از ایران نیز پژوهش‌های زیادی در این خصوص انجام گرفته که برخی از آن‌ها فقط به شرایط قطعیت پرداخته‌اند، چنانچه ام سی هنری¹ (2012) با استفاده از نرم‌افزار هومر ارزیابی اقتصادی انجام داده و به این نتیجه رسیده که تفاوت چندانی بین سیستم فتوولتائیک و سیستم برق دیزلی وجود دارد و فقط وقتی هزینه سیستم توزیع برق زیاد می‌شود، می‌توان از سیستم فتوولتائیک استفاده کرد. برانکر و همکاران² (2011) از روش هزینه تراز شده برق³ برای مقایسه بین هزینه برق تمام‌شده هر کیلووات ساعت برق فتوولتائیک با دیگر منابع دیگر برای تأمین برق استفاده می‌کنند. در این حالت تمامی هزینه‌های طول عمر پروژه را به سال پایه آورده و بر تمام تولید برقی که به سال پایه تنزیل شده، تقسیم می‌کنند. با توجه به مطالعه موردی که نویسندگان برای کانادا انجام داده‌اند، به این نتیجه رسیده‌اند که با پیشرفت فناوری در زمینه پایین آمدن هزینه‌های فتوولتائیک و نیز گران بودن هزینه برق حاصل از سوخت هاب فسیلی استفاده از برق فتوولتائیک گزینه‌ای مناسب است. رمدهان⁴ و همکاران (2011) در ارزیابی اقتصادی برق خورشیدی از فاکتور هزینه تراز شده برق (LCOE) استفاده کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که برای یک نیروگاه خورشیدی 1MW هزینه هر کیلووات ساعت در سطح کارایی 15 درصد در حدود 20 سنت است و با توجه به هزینه دو سنت برای انتشار دی‌اکسید کربن حاصل از تولید یک کیلووات ساعت برق می‌توان به فکر استفاده از برق خورشیدی افتاد. پریوترا⁵ و همکاران (2011) به بررسی این موضوع پرداخته‌اند که چگونه می‌توان با استفاده از برنامه‌ریزی خطی به انتخاب ترکیبی از فناوری‌های تجدیدپذیر برای استفاده در ساختمان‌ها به هدف کاهش انتشار دی‌اکسید کربن پرداخت و نتایج نشان می‌دهد که هرچه از سیستم فتوولتائیک کوچک‌تر استفاده شود و از توربین بادی بزرگ‌تر استفاده شود، صرفه اقتصادی بیشتر است. از افرادی دیگری که پژوهش‌هایی را در زمینه ارزیابی اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک در شرایط قطعیت انجام داده‌اند، می‌توان به هارد⁶ (2011)، یوستس ماکا⁷ (2010)، کالدلیس⁸ (2004)، شارما⁹ (1995) اشاره کرد.

از میان مقاله‌هایی که عدم قطعیت‌ها را برای طراحی سیستم فتوولتائیک در نظر گرفته‌اند می‌توان به مقاله‌های کسانی چون هوافن هو¹⁰ (2012)، آرون¹¹ (2009) و اسکینتزر¹² اشاره کرد. هوافن هو (2012) منابع

1- McHenry
 2- Branker
 3- Levelized Cost of Electricity (LCOE)
 4- Mohammad Ramadhan
 5- Giovanni Privitera
 6- Elizabeth Harder
 7- Nfah Eustace Mbaka
 8- Kaldellis
 9- Sharma
 10- Huafen Hu
 11- Arun
 12- Marie Schnitzer

عدم قطعیتی را که در طراحی سیستم فتوولتائیک تأثیرگذار است، خطای فیزیک ساختمان و پارامترهای عملکرد، خطای عددی، خطای مدل کردن و خطای سناریو معرفی می‌کند. آرون¹ و همکاران (2009) از شبیه‌سازی مونت کارلو برای مقابله با عدم قطعیت استفاده کرده و میزان تابش خورشید و سطح انرژی موجود در باتری‌ها از منابع عدم قطعیت هستند. اسکیتزر² (2009) هم تأثیر عدم قطعیت تابش خورشید بر روی اقتصادی بودن پروژه را بررسی می‌کند.

هدف از انجام این مقاله، ارزیابی اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه، برای روستاهای تهران به جای توسعه شبکه برق سراسری است. برای این هدف، هزینه‌های ایجاد سیستم فتوولتائیک برای یک روستا با شرایط آب‌وهوایی شهر تهران محاسبه شده و سپس با هزینه‌های توسعه شبکه برق سراسری برای همین روستا مقایسه می‌شود تا معلوم شود تحت چه شرایطی استفاده از سیستم فتوولتائیک مقرون به صرفه است. به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در طراحی سیستم فتوولتائیک از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود. بر این اساس، نوآوری‌های این مقاله نسبت به کارهای مشابه قبل را می‌توان در نظر گرفتن همه عدم قطعیت‌هایی که بر روی طراحی سیستم فتوولتائیک تأثیر می‌گذارند، در نظر گرفتن روستاهای بین یک تا 50 خانوار برای مطالعه به جای بررسی روستایی با تعداد خانوار ثابت و استفاده از نرخ تنزیل و تعداد روز ابری متوالی مختلف به منظور مطالعه جامع دانست.

روش تحقیق

فتوولتائیک پدیده‌ای است که بدون استفاده از مکانیسم‌های مکانیکی، انرژی تابشی را به الکتریکی تبدیل می‌کند. این پدیده بر فرضیه ذره‌ای بودن انرژی تابشی بنا نهاده شده است. هر سامانه‌ای نیز که از این خاصیت استفاده کند، سیستم فتوولتائیک نام دارد (محمدی و همکاران، 1383).

اجزای یک سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه عبارت است از: پنل خورشیدی، شارژ کنترلر، باتری و اینورتر. تعداد اجزای لازم برای سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه به پارامترهای زیادی وابسته است. تعداد روزهای ابری، ساعت‌های آفتابی روزانه، زاویه پنل‌ها با سطح افق، توان و راندمان پنل‌ها، ظرفیت و ولتاژ باتری‌ها، تلفات سیستم، عمق دشارژ باتری، توان وسایل برقی، زمان استفاده از وسایل برقی در شب یا روز و توان همزمان وسایل برقی از جمله مواردی است که بر نوع و تعداد تجهیزات مورد استفاده در یک سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه اثر می‌گذارد (حاتمی و همکاران، 1392). جدول 1 متغیرهای مؤثر بر طراحی

1- Arun
2- Schnitzer

سیستم فتوولتائیک را معرفی کرده و روابط (1) تا (7) نیز روابط موردنظر برای طراحی سیستم فتوولتائیک را نشان می‌دهند:

(1) توان لازم برای مجموعه پنل‌ها (WP)

$$WP = \text{Roundup} \left(\frac{WH \cdot (1+Z) \cdot (1+T)}{5} \right)$$

(2) تعداد پنل خورشیدی (NP)

$$NP = \text{Roundup} \left(\frac{WP}{P} \right)$$

(3) حداکثر تعداد پنل متصل شونده به هر شارژ کنترل (HP)

$$HP = \text{int} \left(\frac{IC}{IC} \right)$$

(4) حداقل ظرفیت لازم برای باتری بانک (BB):

$$BB = \text{Roundup} \left(\frac{WN + (2 \cdot WH)}{V} \cdot (2 - D) \right)$$

(5) تعداد باتری (NB):

$$NB = \frac{V}{VB} \cdot \text{Roundup} \left(\frac{BB}{2B} \right)$$

(6) تعداد شارژ کنترل (NC)

$$NC = \text{Roundup} \left(\left(\frac{NP}{VF} \right) / HP \right)$$

(7) کمترین توان الکتریکی مناسب برای اینورتر (WI)

$$WI = \text{Roundup} (W \cdot TI)$$

در رابطه فوق، معمولاً گاهی اندازه اینورتر را بزرگ‌تر انتخاب می‌کنند که اگر مقدار توان همزمان سیستم افزایش یافت اینورتر بتواند بار لازم را برای وسایل برقی فراهم کند.

هزینه‌های یک سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه با توجه به تمامی هزینه‌های آن در طول عمر سیستم محاسبه می‌شود که این هزینه‌ها بر نوع هزینه خرید تجهیزات و نصب هزینه نگهداری و تعمیرات در طول عمر

سیستم هستند.

جدول 1- معرفی پارامترهای لازم برای محاسبه تعداد اجزای سیستم فتوولتائیک

نام پارامتر	شرح	نام پارامتر	شرح
JC	جریان ورودی شارژ کنترل	WH	جمع وات ساعت مصرفی در شبانه روز
Wp	توان لازم برای مجموعه پنل ها	Z	تعداد روزهای ذخیره (بری)
NB	تعداد باطری	T	تلفات سیستم
D	عمق دشارژ باطری	V	ولتاژ سیستم
ZB	ظرفیت باطری	S	میانگین ساعت آفتابی روزانه
VB	ولتاژ باطری	P	توان اسمی پنل
BB	حداقل ظرفیت لازم برای باطری بانک	VP	ولتاژ اسمی پنل
WN	مجموع مصرف انرژی در شب	NP	تعداد پنل
W	مجموع توان همزمان وسایل	IC	جریان اتصال کوتاه پنل
TI	درصد تلفات اینورتر	HP	حداکثر تعداد پنل قابل اتصال به هر شارژ کنترل
Wi	کمترین توان الکتریکی مناسب برای اینورتر	NC	تعداد شارژ کنترل
Int	جزء صحیح عدد	VC	ولتاژ ورودی شارژ کنترل
Roundup گرد کردن عدد به سمت عدد بزرگتر از خود			

هزینه خرید تجهیزات شامل هزینه خرید پنل خورشیدی، شارژ کنترل، باطری و اینورتر است و هزینه نصب به صورت حاصل ضرب یک ضریب در مجموع توان نصب شده پنل هاست. در این مقاله، هزینه نصب 0/12 دلار برای هر وات پنل در نظر گرفته شده است. البته آشیانه گذاری و فضولات پرندگان هم باعث نتابیدن خورشید به سطح پنل شده و هم فضولات حیوانی به دلیل داشتن اسید اوریک در درازمدت بر روی فلز و مواد پنل تأثیر می گذارد و باید بازرسی روزانه به منظور رفع این مشکلات انجام شود (کروتز¹ و همکاران، 2005). ارزش زمان حال هزینه سیستم فتوولتائیک از رابطه زیر به دست می آید:

$$PC = C_0 + C_s + \sum_{t=1}^{t=N} \frac{C_{bt}}{(1+i)^t} \quad (8)$$

در رابطه 8، PC ارزش زمان حال هزینه های سیستم فتوولتائیک در طول دوره عمر سیستم است، C_0 هزینه خرید تجهیزات در سال پایه، C_s هزینه نصب، C_{bt} هزینه تعویض باطری در سال t است، در این تحقیق عمق شارژ باطری ها 0/3 در نظر گرفته شده و مطابق اطلاعات فنی باطری های شرکت فاران، باطری ها باید هر چهار

سال یک بار تعویض شوند، i نرخ تنزیل و N طول عمر سیستم فتوولتائیک است. اگر هزینه سیستم فتوولتائیک برای یک خانوار $C1$ باشد آنگاه هزینه سیستم فتوولتائیک برای یک روستا با m خانوار برابر C_m است که از رابطه 9 به دست می آید.

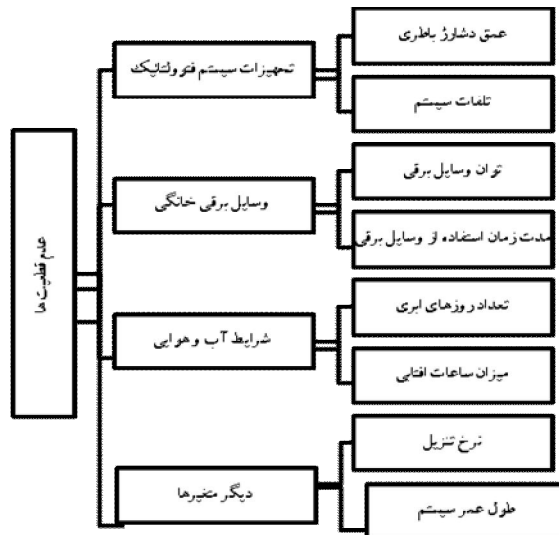
$$C_m = m.C1 \quad (9)$$

بر این اساس، هزینه توسعه شبکه برق سراسری برای یک روستای با m خانوار عبارت است از:

$$f_m(d) = C_d + C_p + C_m + C_c \quad (10)$$

در رابطه 10، C_d هزینه اجرای خطوط برق است که وابسته به فاصله از شبکه توزیع است، C_p هزینه اجرای پست هوایی توزیع و وابسته های آن، C_m ارزش حال هزینه نگهداری و تعمیرات در طول دوره عمر پروژه است که در هر سال تکرار شده است و C_c هزینه کابل های شبکه توزیع است. از برابر قرار دادن هزینه برق رسانی به روستا در دو روش می توان فاصله اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک را برای روستا به دست آورد. این فاصله اقتصادی برابر d^* است که به صورت زیر به دست می آید:

$$d^* = f_m^{-1}(C_m) \quad (11)$$



شکل 1- منابع عدم قطعیت در طراحی سیستم فتوولتائیک

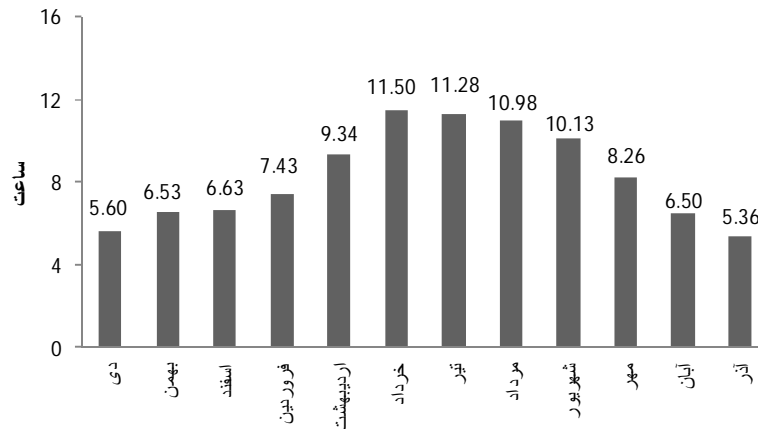
عدم قطعیت‌هایی که در طراحی سیستم فتوولتائیک در این تحقیق در نظر گرفته شده است، در شکل 1 نشان داده شده است. به منظور شبیه‌سازی مونت کارلو برای هر کدام از متغیرهای دارای عدم قطعیت، 2000 عدد تصادفی با توجه به تابع توزیع احتمال آن‌ها تولید می‌شود؛ و از این عددها در شبیه‌سازی استفاده می‌شود. همچنین متغیرهایی که در این مقاله بر اساس تابع توزیع احتمال برای آن‌ها عدد تصادفی تولید می‌کنیم، در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2- تابع توزیع احتمال متغیرهای دارای عدم قطعیت

متغیر	توزیع احتمالی
تلفات اینورتر	توزیع یکنواخت بین 5% تا 15%
تلفات کابل	توزیع یکنواخت بین 2% تا 3%
ولتاژ سیستم	توزیع گسسته با احتمال یکسان 0/5 برای 12 و 24 ولت
تلفات شارژ کنترل	توزیع یکنواخت بین 4% تا 6%
طول عمر پروژه	توزیع گسسته با احتمال یکسان برای 25 تا 30 سال
انتخاب نوع پنل	توزیع گسسته با احتمال یکسان برای انتخاب انواع پنل
انتخاب نوع شارژ کنترل	توزیع گسسته با احتمال یکسان برای انتخاب انواع شارژ کنترل
زمان استفاده از لامپ	بر اساس تابع مدت‌زمان بین غروب آفتاب تا 12 شب در شش ماه دوم سال
زمان استفاده از یخچال فریزر	در روز بر اساس تابع فاصله بین طلوع تا غروب آفتاب در شش ماه دوم سال و زمان استفاده در شب بر اساس تفاضل عدد 24 از تابع زمان مصرف در روز است.
زمان استفاده از تلویزیون	در روز بر اساس توزیع یکنواخت بین 3 تا 4 ساعت و زمان استفاده در شب نیز توزیع یکنواخت بین 3 تا 4 ساعت است.
زمان استفاده از کولر آبی	در روز بر اساس توزیع یکنواخت بین 3 تا 4 ساعت و زمان استفاده در شب نیز توزیع یکنواخت بین 7 تا 8 ساعت است.
زمان استفاده از ماشین لباسشویی	توزیع یکنواخت بین 1 تا 1/25 ساعت.
زمان استفاده از وسیله صوتی	در روز بر اساس توزیع یکنواخت بین 1.5 تا 2 ساعت و زمان استفاده در شب نیز توزیع یکنواخت بین 1/5 تا 2 ساعت
انتخاب نوع باتری	توزیع گسسته با احتمال یکسان برای انتخاب انواع باتری با ظرفیت‌های گوناگون

مطابق آخرین سرشماری آمار و اطلاعات روستایی شهرستان تهران در سال 90، تعداد 86 روستا در این شهرستان وجود دارد که 66 روستا دارای سکنه بوده و از این تعداد 60 روستا دارای برق شبکه سراسری هستند. علاوه بر این، با پیدایش روستاهای جدید در این شهرستان لزوم توجه به تأمین برق آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است.

میانگین ساعت‌های آفتابی روزانه در ماه‌های مختلف بر اساس داده‌های سایت هواشناسی برای ایستگاه مهرآباد با طول جغرافیایی 51 19 E و عرض جغرافیایی 35 41 N و ارتفاع 1190 متر از سطح دریا مطابق شکل 2 است.



شکل 2- متوسط ساعت‌های آفتابی روزانه در ماه‌های مختلف سال در تهران

نتایج و بحث

در جدول 3 برای روستاهای بین یک تا 50 خانوار فاصله اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک در سطح اطمینان 95 درصد و نرخ‌های تنزیل 18 درصد، 20 درصد و 22 درصد و روزهای ابری متوالی صفر تا سه روز، با استفاده از رابطه 11 نشان داده شده است (لازم به ذکر است که به دلیل اینکه نرخ بهره سپرده‌های بانکی بلندمدت بیشتر بین 18 تا 20 درصد است، نرخ بهره بانکی را معیاری برای نرخ تنزیل در نظر گرفته‌ایم). تفسیر اطلاعات این جدول به این صورت است که به عنوان مثال، در نرخ تنزیل 22 درصد و یک روز ابری برای یک روستای 11 خانواری که فاصله آن از شبکه توزیع بیشتر از 16/09 باشد، استفاده از سیستم فتوولتائیک برای دولت به صرفه‌تر از توسعه شبکه برق سراسری است.

با توجه به جدول 3 و شکل 3 که برای صفر روز ابری ترسیم شده، مشخص است که در هر سطح روز ابری با افزایش نرخ تنزیل، فاصله اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک کمتر می‌شود؛ زیرا با افزایش نرخ تنزیل، هزینه سیستم فتوولتائیک کمتر شده و در نتیجه در فاصله‌های کمتر توان رقابت اقتصادی و پیشی گرفتن از سیستم توزیع شبکه برق سراسری را دارد.

جدول 3- فاصله اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک در شرایط مختلف نرخ تنزیل و روز ابری (کیلومتر)

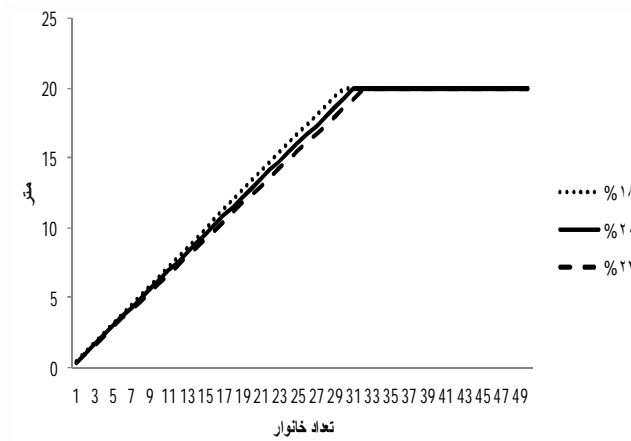
	صفر روز ابری			یک روز ابری			دو روز ابری			سه روز ابری		
	%18	%20	%22	%18	%20	%22	%18	%20	%22	%18	%20	%22
1	0/47	0/45	0/43	1/32	1/26	1/21	2/17	2/07	1/99	3/01	2/87	2/76
2	1/24	1/19	1/15	2/93	2/8	2/7	4/63	4/44	4/27	6/32	6/04	5/81
3	2/03	1/93	1/87	4/54	4/35	4/2	7/09	6/8	6/55	9/63	9/21	8/86
4	2/78	2/67	2/58	6/15	5/9	5/69	9/55	9/16	8/83	12/93	12/37	11/91
5	3/55	3/42	3/3	7/76	7/45	7/19	12/02	11/53	11/11	16/23	15/54	14/96
6	4/31	4/15	4/02	9/37	8/99	8/69	14/47	13/89	13/39	19/54	18/71	18/02
7	5/04	4/85	4/7	10/94	10/5	10/14	16/89	16/21	15/63	20	19/99	19/99
8	5/81	5/6	5/42	12/55	12/04	11/63	19/35	18/57	17/91	20	20	20
9	6/58	6/34	6/13	14/16	13/59	13/13	19/99	19/99	19/99	20	20	20
10	7/32	7/05	6/83	75/74	15/11	14/6	20	20	20	20	20	20
11	8/09	7/79	7/54	17/35	16/66	16/09	20	20	20	20	20	20
12	8/85	8/53	8/26	18/96	18/21	17/59	20	20	20	20	20	20
13	9/59	9/25	8/97	19/99	19/72	19/06	20	20	20	20/01	20	20
14	10/36	9/98	9/67	19/99	19/99	19/99	20	20	20	21/25	20/34	20/01
15	11/13	10/73	10/39	20	20	19/99	20	20	20	22/77	21/81	20/01
16	11/9	11/47	11/11	20	20	20	20	20	20	24/31	23/28	22/42
17	12/67	12/21	11/82	20	20	20	20	20	20	25/83	24/74	23/84
18	13/43	12/94	12/55	20	20	20	20/33	20	20	27/37	26/2	25/25
19	14/14	13/65	13/24	20	20	20	21/45	20/58	20/01	28/87	27/64	26/63
20	14/92	14/38	13/93	20	20	20	22/59	21/68	20/9	30/4	29/11	28/06
21	15/68	15/11	14/64	20	20	20	23/72	22/78	21/96	31/94	30/57	29/47
22	16/46	15/86	15/36	20	20	20	24/86	23/87	23/01	33/47	32/05	30/88
23	17/22	16/6	16/08	20	20	20	26	24/96	24/06	35	33/5	32/28
24	17/99	17/34	16/8	20	20	20	27/14	26/06	25/12	36/53	34/97	33/71
25	18/67	18/01	17/48	20	20	20	28/25	27/11	26/13	38/01	36/39	35/08
26	19/43	18/76	18/2	20	20	20	29/38	28/21	27/2	39/54	37/85	36/49
27	19/99	19/47	18/86	20/01	20	20	30/51	29/29	24/28	41/08	39/32	37/88
28	19/99	19/99	19/59	20/63	20/01	20	31/67	30/39	29/29	42/61	40/79	39/3
29	19/99	19/99	19/99	21/38	20/53	20/01	32/8	31/48	30/35	44/14	42/25	40/71
30	20	19/99	19/99	22/12	21/24	20/53	33/94	32/58	31/41	45/67	43/72	42/12
31	20	20	19/99	22/87	21/96	21/22	35/08	33/67	32/47	47/2	45/19	43/53
32	20	20	20	61/23	68/22	92/21	22/36	77/34	52/33	74/48	65/46	95/44
33	20	20	20	36/24	4/23	61/22	36/37	86/35	58/34	27/50	12/48	36/46
34	20	20	20	1/25	11/24	29/23	5/38	96/36	63/35	8/51	58/49	77/47

ادامه جدول 3

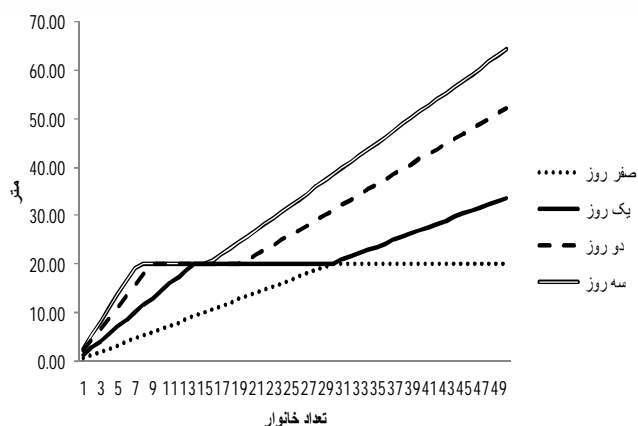
	صفر روز ابری			یک روز ابری			دو روز ابری			سه روز ابری		
	%20	%22	%18	%20	%22	%18	%20	%22	%18	%20	%22	%18
35	20	20	20	25/85	24/82	23/99	39/64	38/05	36/69	53/33	51/05	49/18
36	20	20	20	26/6	25/55	24/68	40/78	39/15	37/74	54/86	52/51	50/59
37	20	20	20	27/34	26/26	25/38	41/92	40/24	38/8	56/39	53/98	52/01
38	20	20	20	28/08	26/97	26/07	43/06	41/34	39/85	57/92	55/44	53/42
39	20	20	20	28/83	27/69	26/77	44/18	42/42	40/9	59/44	56/94	54/85
40	20	20	20	29/55	28/38	27/43	45/29	43/48	41/95	60/93	58/36	56/23
41	20	20	20	30/3	29/09	28/12	46/43	44/57	43/01	62/46	59/83	57/64
42	20	20	20	31/04	29/81	28/81	47/57	45/67	44/06	63/99	61/29	59/05
43	20	20	20	31/79	30/53	29/5	48/73	46/78	45/11	65/55	62/75	60/46
44	20	20	20	32/53	31/25	30/19	49/87	47/88	46/16	67/08	64/21	61/87
45	20	20	20	33/28	31/96	3/59	51/01	48/97	47/22	68/61	65/68	63/28
46	20	20	20	34/03	32/67	31/59	52/15	50/07	48/27	70/14	67/15	64/69
47	20	20	20	34/77	33/39	32/28	53/29	51/16	49/33	71/67	68/61	66/1
48	20	20	20	35/52	34/11	32/97	54/41	52/23	50/39	73/18	70/1	67/54
49	20	20	20	36/27	34/83	33/66	55/55	53/32	51/45	74/71	71/57	68/95
50	20	20	20	36/96	35/49	34/31	65/56	54/38	52/43	76/19	72/98	70/32

مأخذ: یافته‌های تحقیق

همچنین با توجه به جدول 3 و نمودار شکل 4 که برای نرخ تنزیل 18 درصد ترسیم شده، مشخص است که در هر سطح نرخ تنزیل با افزایش تعداد روز ابری در واقع فاصله اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک زیادتر می‌شود، زیرا با افزایش روز ابری هزینه سیستم فتوولتائیک بیشتر شده و در نتیجه فقط در فاصله‌های دور توان رقابت اقتصادی و پیشی گرفتن از سیستم توزیع شبکه برق سراسری را دارد.



شکل 3- فاصله اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک برای روستاهای زیر 50 خانواری در صفر روز ابری



شکل 4- فاصله اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک برای روستاهای زیر 50 خانواری برای نرخ تنزیل 18%

در پژوهش‌های قبلی، فقط از متغیرهای قطعی برای ارزیابی اقتصادی استفاده شده و عددی ثابت به‌عنوان ورودی و خروجی ارزیابی اقتصادی بیان شده است (مانند پژوهش‌های اسراری، حسنی، منشی پور، خوش‌اخلاق) و در صورت انحراف کوچکی در ورودی‌های تحقیق نتایج کاملاً عوض می‌شود اما در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو تمامی عدم قطعیت‌های ممکن برای ارزیابی اقتصادی و فنی

بررسی شده‌اند و به جای معرفی یک عدد ثابت برای فاصله اقتصادی یک فاصله اقتصادی در سطح اطمینان 95 درصد بیان شده است و پدیده‌های تأثیرگذار بر روی طراحی سیستم فتوولتائیک به صورت واقعی و نه فرضی بررسی شده‌اند و این نشان‌دهنده قدرت شبیه‌سازی مونت کارلو در بررسی پدیده‌های دارای عدم قطعیت و شبیه‌سازی آن‌ها در سطح اطمینان دلخواه است. به عنوان مثال منشی‌پور فاصله 22 کیلومتر از شبکه توزیع را به عنوان فاصله اقتصادی معرفی می‌کند ولی این عدد نه عدم قطعیت‌های مدل و نه تغییر متغیرها نظیر روز ابری یا ساعت مصرف وسایل برقی را نشان می‌دهد؛ در حالی که در این مقاله با شبیه‌سازی مونت کارلو تمامی متغیرها همراه با تغییرهایشان (توزیع احتمال پارامتر) بررسی شده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، ارزیابی اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه برای روستاهای تهران به جای توسعه شبکه برق سراسری صورت گرفت که نتایج به دست آمده از آن نشان داد که استفاده از سیستم فتوولتائیک به جای برق شبکه سراسری برای برق‌رسانی به روستاها از توجه و صرفه اقتصادی خوبی برخوردار است. چنانکه در بدترین حالت، بیشترین هزینه سیستم فتوولتائیک یعنی نرخ تنزیل 18 درصد و تعداد خانوار 50 و تعداد روز ابری 3 باز در فاصله 76 کیلومتری روستا از شبکه توزیع برق، استفاده از سیستم فتوولتائیک از توسعه شبکه برق سراسری اقتصادی‌تر است. همیشه برای روستاهای زیر 50 خانوار وقتی که فاصله روستا از شبکه توزیع بیش از 76 کیلومتری باشد، برق فتوولتائیک نسبت به شبکه توزیع سراسری برای دولت اقتصادی‌تر است. اگر متغیرهای نرخ تنزیل و تعداد روز ابری ثابت باشد، با افزایش تعداد خانوارهای روستا، فاصله اقتصادی افزایش می‌یابد؛ یعنی هرچه فاصله روستا از شبکه توزیع برق بیشتر باشد، آنگاه استفاده از سیستم فتوولتائیک برای برق‌رسانی به روستا برای دولت به صرفه‌تر است و از طرف دیگر وقتی متغیرهای تعداد خانوار روستا و نرخ تنزیل ثابت باشد، با افزایش تعداد خانوارهای روستا و تعداد روز ابری بیشتر می‌شود، همچنین وقتی متغیرهای تعداد خانوارهای روستا و تعداد روز ابری ثابت باشد، با افزایش نرخ تنزیل چون هزینه سیستم فتوولتائیک کم می‌شود، پس فاصله اقتصادی کمتر می‌شود. به صورت خلاصه می‌توان گفت که فاصله اقتصادی با تعداد خانوارهای روستا و تعداد روز ابری نسبت مستقیم و با نرخ بهره، نسبت عکس دارد. برخلاف پژوهش‌های قبلی که فاصله خاصی را برای روستایی با تعداد خانوار ثابت به عنوان فاصله اقتصادی تعیین می‌کردند، در این مقاله برای تمامی روستاهای زیر 50 خانوار فاصله اقتصادی وجود دارد و می‌توان نتیجه گرفت که هر روستایی که فاصله‌اش از شبکه توزیع بیش از 76 کیلومتر است، حتماً برق فتوولتائیک برای آن روستا به صرفه است.

منابع

- بهادری نژاد م. و فرهمندپور ب (1385) طراحی و بررسی اقتصادی سیستم برق خورشیدی برای یک ساختمان اداری در تهران، بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق.
- حاتمی م. و دولت‌آبادی ا (1392) محاسبه قیمت برق سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه با تعداد روزهای ابری مختلف در سرپل ذهاب. سومین کنفرانس سالانه انرژی پاک.
- حسنی ع. و جورابیان م (1390) بررسی فنی و اقتصادی نیروگاه فتوولتائیک یک‌صد کیلوواتی. سومین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران.
- خوش‌اخلاق ر.، شریفی ع. و کوچک‌زاده م (1383) ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی خورشیدی در مقایسه با نیروگاه دیزلی. پژوهش‌های اقتصادی ایران. 24: 171-192.
- محمدی س.، کیهانی ر. و صمیمی ا (1383) ارزیابی فنی و اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک در مناطق دوردست. امواج برتر. 8: 55.
- منشی پور س. و عبداللهی ر (1386) ارزیابی اقتصادی پکیج برق خورشیدی در برق‌رسانی به مناطق فاقد دسترسی به شبکه سراسری برق، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق.
- Arun P., Banerjee R. and Bandyopadhyay S (2009) Optimum sizing of photovoltaic battery systems incorporating uncertainty through design space approach. *Solar Energy*. 83: 1013-1025.
- Asrari A., Ghasemi A. and Javidi M (2012) Economic evaluation of hybrid renewable energy systems for rural electrification in iran a case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16: 3123– 3130.
- Bhattacharyya S (2012) Review of alternative methodologies for analysing off-grid electricity supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16: 677– 694.
- Branker K., Pathak M. and Pearce J (2011) A review of solar photovoltaic leveled cost of electricity, renewable and sustainable energy reviews. 15: 4470– 4482.
- Caisheng W., Nehrir M (2008) Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system. *IEEE Trans. on Energy Conversion*. 23.
- Harder E. and Macdonald Gibson J (2011) The costs and benefits of large-scale solar photovoltaic power production in abu dhabi, united arab emirates. *Renewable Energy*. 36: 789-796.

- Huafen H (2012) Houses risk-conscious design of off-grid solar energy. *Building and Environment*. 50: 90-103.
- Kaldellis J., Koronakis P. and Kavadias K (2004) Energy balance analysis of a stand-alone photovoltaic system, including variable system reliability impact. *Renewable Energy*. 29: 1161-1180.
- Krauter S. and Hanitsch R (2005) How to carry out pv-projects in the tropics. 20th European photovoltaic solar energy conference and exhibition.
- Mbaka N., Mucho N. and Godpromesse K (2010) Economic evaluation of small-scale photovoltaic hybrid systems for mini-grid applications in far north cameroon. *Renewable Energy*. 35: 2391-2398.
- McHenry M (2012) A technical, economic, and greenhouse gas emission analysis of a homestead-scale grid-connected and stand-alone photovoltaic and diesel systems, against electricity network extension. *Renewable Energy*. 38: 126-135.
- Privitera G. R., Day A., Dhesi G. and Long D (2011) Optimising the installation costs of renewable energy technologies in buildings: a linear programming approach. *Energy and Buildings*. 43: 838-843.
- Ramadhan M. and Naseeb A (2011) The cost benefit analysis of implementing photovoltaic solar system in the state of Kuwait. *Renewable Energy*. 36: 1272-1276.
- Sharma V., Colangelo A. and Spagna G (1995) Photovoltaic technology: basic concepts, sizing of a stand alone photovoltaic system for domestic applications and preliminary economic analysis. *energy convers*. 3: 161-174.
- Schnitzer M., Thuman C. and Johnson P (2012) The impact of solar uncertainty on project financeability: mitigating energy risk through on-site monitoring, AWS Truepower, LLC 463 New Karner Road Albany, NY 1220.

Economic Evaluation of Using off Grid Photovoltaic System in Rural Areas with Monte Carlo Simulations (Case Study of Tehran)

Mehdi Hatami^{1*}, Ali Nazemi², Azam Dowlatabadi³ and Mostafa Mostafapour⁴

Received: 1 March, 2014

Accepted: 10 April, 2014

Abstract

According to TAVANIR company's statistics, despite fulfilling the electricity supply plans to the villages with more than 20 families in rural areas of Iran, Still, more than 17,000 rural families in villages ,with populations less than 20 families, are deprived from accessing to the electricity. Production Losses, transmission and distribution of electricity and the distribution of the population cause use of solar energy in remote areas. Hence, photovoltaic systems, because of direct conversion of solar energy into electricity without the need for sophisticated equipment are important. In this paper, an economic evaluation of Off Grid photovoltaic systems against national power grid has been studied in Tehran villages, due to the uncertainty in modeling; Monte Carlo simulation with 2000 iterations was used. We did Economic evaluation, using the life cycle cost of a photovoltaic system for a period of 25 to 30 years as well as the development costs for the power grid to remote villages. The paper shows the minimum distance of the village distribution network that the photovoltaic system is more economical than the national power grid development. This distance has inverse relation with discount rate as well as direct relation with the number of cloudy days and the number of rural families.

Keywords: Economic Evaluation, Renewable Energy, Monte Carlo simulation, Photovoltaic System, Uncertainty

1- Master of industrial engineering, National Iranian South Oil Company.

2- PhD in Economics - University of Economic Science.

3- Master of business management.

4- Master of industrial engineering.

(*- Corresponding author Email: Mehdihatami1000@gmail.com)