



Investigating the Feasibility of Increasing the Participation of Solar Power Plants in Supplying Load during the Peak Hours of the Day

Haniye Alimohamadi¹, Roohalamin Zeinali Davarani², Mehdi Shafiee^{3*}

¹MSc, Faculty of Engineering, Azad Islamic University, Rafsanjan, Iran.

²Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Gradutae University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

³Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 10.16.2022

Revised: 02.13.2023

Accepted: 04.10.2023

Keyword:

Photovoltaic Panel

Installation Angle

Voltage Profile

Power Loss

Network Peak Load

*Corresponding Author:

Mehdi Shafiee

Email: m-shafiee@tvu.ac.ir

ABSTRACT

The use of photovoltaic panels in power grids around the world is expanding. If these panels are equipped with a solar tracker, they produce the maximum amount of possible power every hour. However, since the use of these trackers increases investment and maintenance costs, many of these panels are installed without using trackers. Fixed panels are generally installed in such a way that the maximum annual output power is generated. Considering the sharp increase in load during peak hours, it is necessary to investigate the possibility of increasing the participation of fixed photovoltaic power plants in providing peak load. For this purpose, the design of the photovoltaic power plant was studied in two scenarios. In the first scenario, the photovoltaic panels were installed based on the increase in annual output power generation, and in the second scenario, the photovoltaic panels were installed based on the increase in power generation during the peak hours of the day. The obtained results showed that although the second approach led to a decrease in the total annual power generation by photovoltaic panels, the participation of photovoltaic power plants in supplying the peak load was increased, and the amount of network annual losses decreased than the first approach.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Lack of energy resources, the increase in energy demand due to population growth, the widespread use of energy in the affairs of human societies, the existence of concerns in the field of climate change due to the emission of greenhouse gases, the limitation and non-renewability of fossil energy sources, and environmental pollution indicate the necessity of using renewable energies. Solar energy is one of the most suitable renewable energies. Considering the abundance of sunlight and the valuable capacity that exists in the field of solar energy exploitation, increasing the efficiency of solar power plants has significant technical, economic and environmental benefits. Photovoltaic systems consist of a number of solar panels that absorb sunlight and convert it directly into electricity. The most important component of these systems are the panels. The installation angle, tilt angle, and the angle between panel surface and sunlight beam have a major impact on the amount of energy received by photovoltaic panels. Fixed panels receive the sunlight obliquely at sunrise and sunset and absorb only a small amount of solar energy. These panels can have acceptable absorption only in the middle of the day when they are almost facing the sun. In order to absorb the maximum power from the solar panels, solar tracking systems are installed on them. Solar tracking systems track the path of sunlight and adjust the position of the solar panel for maximum use of sunlight. In many cases, the use of solar trackers is not possible due to the high costs of these systems, and investors have become interested in using fixed photovoltaic panels.

Considering the many problems in providing peak load, it is very important to investigate the possibility of greater participation of fixed photovoltaic power plants in providing peak load. Therefore, in the present research, based on increasing the participation of photovoltaic power plants in supplying the peak load of the network (four hours of peak load per day), the appropriate installation angle of photovoltaic panels was obtained.

Simulation results

Studies were carried out based on two scenarios as follows:

- **Scenario 1:** Optimum installation of photovoltaic panels in order to achieve the highest amount of production power at all hours of the year.
- **Scenario 2:** Optimum installation of photovoltaic panels in order to achieve the maximum amount of production power during daily peak hours per year (four peak hours per day).

Based on the considered scenarios, the simulation is carried out and the results are presented in Table 1.

Table 1. Simulation results in the considered scenarios.

Scenario	Optimum installation angle of the photovoltaic panel (degrees)	Total production power in daily peak hours per year (kWh)	Total production power in the year (kWh)	Hourly average power loss during peak hours (kWh)	Hourly average power losses in the year (kWh)
Scenario 1	0	273125	672630	15.55	7.96
Scenario 2	6.7	276080	670180	14.71	7.68

Conclusion

In the current study, the contribution of photovoltaic panels in the load supply at the peak load times were investigated. Based on the load consumption profile and the peak time of the load, the optimal installation of photovoltaic panels was carried out with two approaches. In the first approach, the optimal installation angle for the photovoltaic panel was determined with the aim of maximizing the total energy produced by the photovoltaic panel at all hours of the year, and in the second approach, this angle was determined with the aim of maximizing the total energy produced by the photovoltaic panel during the daily peak hours throughout the year. Next, the power produced by the photovoltaic panel was determined in each of the two approaches. The results demonstrated that in addition to the tilt angle of the photovoltaic panel, the installation angle also plays an important role in the performance of photovoltaic panels. Increasing the power output of photovoltaic panels in the load peak times had a major impact on the reduction of system losses and improving the voltage profile at the load peak times. This effect was such that despite the slight decrease in the annual production of the photovoltaic unit, the maximum annual profit for the owner of the photovoltaic units was obtained.

امکان سنجی افزایش مشارکت نیروگاه‌های خورشیدی برای تأمین بار در ساعات پیک روز

هانیه علی محمدی^۱ ID، روح الامین زینلی داورانی^۲ ID، مهدی شفیعی^۳ ID*

- ۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، رفسنجان، ایران.
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نیروگاه‌های فتوولتائیک که به عنوان یکی از منابع تولید پراکنده شناخته می‌شوند تأثیر قابل توجهی در کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه خواهند داشت. بنابراین میزان تولید این نیروگاه‌ها در ساعات پیک شبکه میزان اثرگذاری نیروگاه‌های فتوولتائیک بر کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه را تحت تأثیر قرار خواهد داد. چنانچه نیروگاه‌های فتوولتائیک مجهز به ردیاب خورشیدی باشند، در هر ساعت بیشترین میزان توان ممکن را تولید می‌کنند. اما از آنجا که استفاده از این ردیاب‌ها هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیرات را افزایش می‌دهد، بسیاری از نیروگاه‌های خورشیدی بدون استفاده از ردیاب نصب می‌شوند. نیروگاه‌های دارای پنل ثابت عموماً به نحوی نصب می‌شوند که حداکثر توان تولیدی سالیانه فراهم گردد و توجهی به میزان تولید در ساعات پیک شبکه نمی‌گردد. اما با توجه به افزایش شدید بار در ساعات پیک روز و متعاقباً افزایش تلفات شبکه، لازم است امکان افزایش مشارکت نیروگاه‌های خورشیدی پنل ثابت در تأمین بار پیک روز مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور طراحی یک نیروگاه خورشیدی در دو رویکرد مورد بررسی قرار گرفته است. در رویکرد اول نحوه نصب پنل‌های خورشیدی بر مبنای افزایش توان تولیدی سالیانه و در رویکرد دوم نحوه نصب پنل‌های خورشیدی بر مبنای افزایش توان تولیدی در ساعات پیک روز (چهار ساعت پرباری در روز) صورت گرفته و میزان تلفات شبکه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که رویکرد دوم اگر چه منجر به کاهش جزئی ۰/۳۶ درصدی مجموع تولید انرژی سالیانه توسط پنل‌های فتوولتائیک شده است، اما علاوه بر افزایش مشارکت نیروگاه‌های خورشیدی در تأمین بار در ساعات پیک روز، کاهش بیشتر میزان تلفات سالیانه شبکه را به دنبال داشته و تلفات توان حدود ۳/۵ درصد بیشتر از رویکرد اول کاهش یافته است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

کلید واژگان:

پنل فتوولتائیک

زاویه نصب

پروفیل ولتاژ

تلفات توان

پیک بار شبکه

*نویسنده مسئول: مهدی شفیعی

پست الکترونیکی:

m-shafiee@tvu.ac.ir

مقدمه

مواردی همچون کمبود منابع انرژی، افزایش تقاضای انرژی به دنبال رشد جمعیت، کاربرد فراگیر انرژی در امور جوامع بشری، وجود نگرانی‌ها در زمینه تغییرات آب و هوایی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، محدودیت و تجدیدنپذیر بودن منابع انرژی فسیلی و همچنین آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از آنها و افزایش دمای کره زمین ضرورت استفاده از انرژی‌های نو را بیش از پیش نشان می‌دهد و منجر به این شده است که انسان برای رهایی از این مشکلات به روش‌های دیگری از تولید انرژی من جمله استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر روی آورد [۱؛ ۲].

در بین تمام منابع انرژی تجدیدپذیر کشف شده، انرژی خورشیدی مناسب‌ترین است. با توجه به فراوانی تابش نور خورشید و امکان تولید برق پاک بدون استفاده از سوخت‌های فسیلی و ظرفیت قابل توجه و ارزشمندی که در زمینه بهره‌برداری از انرژی خورشید وجود دارد، استفاده از نیروگاه‌های فتوولتائیک رو به گسترش می‌باشد. سیستم‌های فتوولتائیک متشکل از تعدادی پنل خورشیدی می‌باشند که نور خورشید را جذب کرده و آن را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. مهم‌ترین جزء این سیستم‌ها، پنل‌ها می‌باشند که نحوه قرارگیری و جهت نصب آنها، در میزان دریافت انرژی و به تبع آن افزایش تولید بسیار مؤثر است.

اکثر نیروگاه‌های فتوولتائیک نصب شده در دنیا دارای ظرفیت کمتر از ۱۰۰ مگاوات بوده و لذا به عنوان منابع تولید پراکنده به شبکه توزیع و فوق توزیع وصل می‌شوند. بنابراین با توجه به نزدیکی نیروگاه‌های فتوولتائیک به مراکز بار، تأثیر قابل توجهی بر میزان تلفات و سایر پارامترهای شبکه توزیع و فوق توزیع خواهند داشت. در مراجع مختلف تحقیقات بسیاری بر روی تأثیر نیروگاه‌های خورشیدی بر شبکه‌های قدرت از جنبه‌های مختلف صورت گرفته است. نویسندگان در مرجع [۳] به بررسی اثر نیروگاه‌های خورشیدی بر پروفیل ولتاژ و تلفات شبکه پرداخته‌اند. در این پژوهش با در نظر گرفتن استراتژی‌های مختلف کنترلی، تعیین ظرفیت و جایابی مناسب نیروگاه خورشیدی صورت گرفته است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد بر اساس محل قرارگیری نیروگاه‌های خورشیدی در شبکه، تلفات شبکه افزایش و یا کاهش پیدا می‌کند. نکته دیگری که در این مقاله به آن اشاره شده است این است که نیروگاه‌های خورشیدی توزیع شده در مقایسه با نیروگاه‌های خورشیدی متمرکز باعث تلفات کمتر و پروفیل ولتاژ مناسب‌تر شبکه می‌شوند. در مرجع [۴] به بررسی اثر نفوذ بالای نیروگاه‌های خورشیدی بر شبکه توزیع پرداخته شده است. در این مقاله اشاره شده است که میزان اثرپذیری شبکه به عوامل مختلفی همچون توپولوژی فیدر، آب و هوا، میزان نفوذ مختلف این نیروگاه‌ها و ... بستگی دارد. در نهایت پژوهشگران در این مقاله بیان می‌دارند مشخصات فیدرها نقش پررنگ‌تری در میزان تلفات و تغییرات پروفیل ولتاژ نسبت به سایر موارد دارند. در مرجع [۵] نویسندگان تأثیر نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی بر پارامترهای شبکه همچون نوسانات ولتاژ، افزایش ولتاژ، بالانس ولتاژ، هارمونیک و دیگر موارد کیفیت توان با بیان جزئیات مربوط به هر یک پرداخته‌اند. در این مرجع به بحث جزیره‌ای شدن نیروگاه‌های خورشیدی که تأثیر بسیاری بر پایداری شبکه دارد نیز اشاره شده است. مرجع [۶] با استفاده از یک روش تحلیلی به بیان ضررهای مالی ناشی از تأثیر نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی در اثر افزایش و یا کاهش ولتاژ یک فیدر توزیع در جنوب استرالیا پرداخته است. در مدل شبیه‌سازی شده پروفیل بار خانگی همراه با محدودیت‌های ولتاژی برای فیدر و اینورترهای نیروگاه بر اساس استاندارد کشور استرالیا در نظر گرفته شده است. در این مقاله نتایج نشان می‌دهد افزایش نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی باعث افزایش لحظه‌ای اضافه ولتاژها در شبکه می‌شود. مرجع [۷] به بررسی اثر نفوذ بسیار بالای نیروگاه‌های خورشیدی بر شبکه توزیع شهری کشور انگلستان پرداخته است. مطالعات بر اساس پخش بار سه فاز نامتعادل در حوزه زمان انجام پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهند حتی با نفوذ بالای نیروگاه‌های خورشیدی، افزایش ولتاژ ناچیز بوده و مشکلی برای شبکه ایجاد نمی‌شود. همچنین با سطوح نفوذ در نظر گرفته شده برای نیروگاه‌های خورشیدی (۳۰٪ و ۵۰٪) تلفات شبکه به مقدار ناچیزی کاهش یافته است. نویسندگان در مرجع [۸] بیان می‌کنند حداکثر سطح نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی در شبکه یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های شبکه قدرت می‌باشد. چرا که تأثیرات منفی و مثبتی بر شبکه می‌تواند داشته باشد. از این رو در این پژوهش به بررسی اثر سطح نفوذ

نیروگاه‌های خورشیدی بر تلفات شبکه با در نظر گرفتن ۳ شبکه تست IEEE پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند با اتصال نیروگاه‌های خورشیدی به باس‌هایی که بار بیشتری دارند، میزان تلفات کل کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. در مرجع [۹] نشان داده شده است که یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین میزان سطح نفوذ قابل قبول منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع مسئله تلفات می‌باشد. چرا که جابجایی نامناسب برای این تولیدات می‌تواند باعث افزایش قابل توجه تلفات شبکه شود. این مطالعه نشان می‌دهد عوامل مؤثر بر تلفات شبکه شامل تعداد، اندازه، محل و ضریب توان منبع تولید پراکنده بوده و چنانچه میزان نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی از حداکثر بار شبکه تجاوز نماید این موضوع باعث افزایش چشمگیر تلفات شبکه خواهد شد.

همان‌طور که اشاره شد میزان توان تولیدی یک منبع تولید پراکنده نقش به‌سزایی بر تلفات شبکه خواهد داشت. برای اینکه یک نیروگاه فتوولتائیک حداکثر تولید خود را داشته باشد باید پنل‌های خورشیدی بالاترین میزان جذب تابش را داشته باشد. برای این منظور لازم است که زاویه تابش بر سطح پنل عمود باشد و هر چه این زاویه، به ۹۰ درجه نزدیکتر باشد، جذب انرژی بیشتر خواهد بود [۱۰؛ ۱۱]. پنل‌هایی که به صورت ثابت نصب می‌شوند در هنگام طلوع و غروب خورشید، نور خورشید را به صورت مایل دریافت می‌کنند و لذا تنها میزان اندکی از انرژی خورشید را جذب می‌کنند. این پنل‌ها تنها در میانه روز که تقریباً رو به خورشید هستند می‌توانند جذب قابل قبولی داشته باشند [۱۲؛ ۱۳]. به منظور جذب حداکثری توان از پنل‌های خورشیدی می‌بایست این پنل‌ها در موقعیتی قرار گیرند که همواره حداکثر تابش ممکن را جذب کنند. برای این منظور بر روی آنها سیستم‌های ردیاب خورشیدی نصب می‌گردد. سیستم‌های ردیاب خورشیدی با استفاده از روش‌های مختلف، مسیر حرکت نور خورشید را ردیابی کرده و موقعیت پنل خورشیدی را برای بهره‌برداری حداکثر از نور خورشید تنظیم می‌کنند [۱۴]. در مراجع مختلف تحقیقات بسیاری بر روی ردیاب‌های خورشیدی و اثر آنها انجام شده است. در مرجع [۱۵] نشان داده شده است که استفاده از ردیاب خورشیدی، قادر است مقدار انرژی دریافتی از خورشید را تا ۴۰ درصد افزایش دهد. در مرجع [۱۶]، مقایسه‌ای بین توان تولیدی پنل‌های فتوولتائیک ثابت و پنل‌های فتوولتائیک دارای ردیاب خورشیدی تک محوره شرق به غرب و دو محوره انجام شده است. در مرجع [۱۷]، پژوهشگران در برزیل توانستند با توسعه دادن منطق کنترل بر ردیاب‌های خورشیدی، میزان تولید سیستم‌های فتوولتائیک را افزایش دهند. در مرجع [۱۸]، نویسندگان یک مدل ردیاب خورشیدی سه وضعیتی و تک محوره را پیشنهاد نموده‌اند که می‌تواند موقعیت ردیاب را فقط در سه زاویه ثابت تنظیم نماید. در این حالت، ردیابی فقط در سه وضعیت صبح، ظهر و عصر صورت گرفته است. مرجع [۱۹]، به مقایسه راندمان نیروگاه فتوولتائیک با پنل ثابت و نیروگاه فتوولتائیک با سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره در محل دانشگاه اورنبرگ می‌پردازد و ثابت می‌کند که راندمان نیروگاه در صورت استفاده از ماژول خورشیدی با سیستم ردیاب دو محوره در مقایسه با ماژول خورشیدی ثابت که در جهت جنوب نصب شده، ۳۶.۱ درصد افزایش یافته است. در مرجع [۲۰]، به منظور کاهش هزینه‌های ناشی از افزودن تجهیزات سیستم ردیاب، از الگوریتم ردیابی هوشمندی استفاده می‌کند که مسیر خورشید را با توجه به موقعیت پنل خورشیدی و تقویم نجومی محلی، بدون استفاده از هیچ سنسوری دنبال کرده و باعث افزایش راندمان سیستم به میزان ۲۰.۲ درصد می‌شود. مرجع [۲۱] به مقایسه عملکرد سیستم ردیاب خورشیدی نسبت به پنل‌های ثابت می‌پردازد و نتایج نشان می‌دهد در بهترین حالت، استفاده از سیستم ردیاب خورشیدی حدود ۴۰٪ راندمان را افزایش می‌دهد. مرجع [۲۲]، به مقایسه ردیاب خورشیدی دو محوره با ماژول خورشیدی ثابت در منطقه ماترا واقع در بخش ساحلی از اکوادور پرداخته است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره به طور متوسط، ۱۹.۶۲ درصد انرژی بیشتری نسبت به سیستم با پنل‌های ثابت تولید می‌کند.

نکته‌ای که در رابطه با تحقیقات صورت گرفته در مراجع قبل می‌توان به آن اشاره کرد این است که در بسیاری از موارد استفاده از سیستم‌های ردیاب به دلیل بالا بودن هزینه‌های مربوط به ردیاب امکان‌پذیر نمی‌باشد. چرا که هزینه‌های ردیاب باعث افزایش چشمگیری در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیرات می‌شود به گونه‌ای که در بسیاری از موارد توجیه

اقتصادی ندارد و سرمایه‌گذاران به دنبال استفاده از پنل‌های فتوولتائیک ثابت می‌باشند. حال این سؤالات مطرح می‌شود که آیا نحوه نصب پنل‌های یک نیروگاه فتوولتائیک ثابت اثرات متفاوتی بر میزان تلفات شبکه خواهد داشت؟ اگر یک کارخانه صنعتی بخواهد با رویکرد نیروگاه خود تأمین برای تأمین بخشی از برق مصرفی خود یک نیروگاه فتوولتائیک ثابت نصب کند آیا می‌تواند طراحی نیروگاه را به نحوی انجام دهد که در ساعاتی که برای دریافت توان از شبکه اصلی با محدودیت مواجه است (ساعات پیک روز)، حداکثر توان تولیدی را از نیروگاه فتوولتائیک دریافت کند؟

از این رو در مقاله حاضر جهت پاسخ به این سؤالات و امکان‌سنجی افزایش مشارکت نیروگاه‌های فتوولتائیک در تأمین بار در ساعات پیک روز، دو رویکرد مورد بررسی قرار گرفته است. در رویکرد اول نحوه نصب پنل‌های فتوولتائیک بر مبنای دریافت حداکثر انرژی تولیدی سالانه صورت می‌گیرد. در رویکرد دوم نحوه نصب پنل‌های فتوولتائیک بر مبنای دریافت حداکثر انرژی در ساعات پیک بار روزانه در سال (چهار ساعت پیربازی در روز) صورت می‌گیرد. برای این منظور با قرار دادن نیروگاه فتوولتائیک در شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE بر مبنای هر کدام از این رویکردها میزان تلفات شبکه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. در ادامه به مدل‌سازی و بیان مسئله بهینه‌سازی مدنظر و روش حل این مسئله پرداخته شده است.

مدلسازی

پنل‌های خورشیدی در شرایط استاندارد می‌توانند ماکزیمم توان خود را که همان توان نامی پنل است تولید کنند. اما در عمل پنل‌های خورشیدی تحت شرایط استاندارد کار نمی‌کنند و تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرند که مهم‌ترین آنها شدت تابش یا تشعشع و دما است. منظور از شرایط استاندارد شرایطی است که در آن تشعشع برابر با ۱ کیلووات بر مترمربع، دمای محیط برابر با ۲۵ درجه سانتی‌گراد و جرم هوا برابر با ۱/۵ واحد باشد. در سیستم‌های فتوولتائیک یا خورشیدی، ماکزیمم توان سلول یا پنل بر اساس رابطه ۱ بیان می‌شود [۱۴].

$$P_{max} = FF \times I_{SC}(G_{on}) \times V_{oc}(T_c) \quad (1)$$

در رابطه بالا منظور از P_{max} حداکثر توانی است که توسط سلول خورشیدی در دما و تشعشع خاص تولید می‌شود. $I_{SC}(G_{on})$ جریان اتصال کوتاه در میزان تابش یا تشعشع G_{on} است. منظور از $V_{oc}(T_c)$ نیز ولتاژ مدار باز سلول در دمای سلول (T_c) است. FF نیز دارای مقدار ثابتی است که برای هر سلول مشخص است. این ضریب از داده‌های استاندارد محاسبه و در شرایط عملکرد محیطی برای محاسبه P_{max} استفاده می‌شود. $I_{SC}(G_{on})$ نیز بر اساس رابطه ۲ بیان می‌شود.

$$I_{SC}(G_{on}) = I_{SC}^b \times G_{on} \quad (2)$$

در رابطه بالا I_{SC}^b ، جریان اتصال کوتاه استاندارد نام دارد و حداکثر جریانی است که در حالت اتصال کوتاه سلول، از آن می‌گذرد. G_{on} نیز بیانگر تشعشع خورشید در سطح پنل است که به همراه دمای هوا از داده‌های ورودی برای حل مسئله بهینه‌سازی است. $V_{oc}(T_c)$ نیز که در رابطه ۱ بیان شد با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$V_{oc}(T_c) = V_{oc}^b - 0.0023 \times n \times (T_c - 25) \quad (3)$$

در این رابطه، V_{OC}^b ولتاژ مدار باز استاندارد نام دارد و حداکثر ولتاژی است که در حالت مدار باز بودن سلول، دو سر آن ایجاد می‌شود. منظور از n نیز تعداد سلول های پنل فتوولتاییک است. T_C نیز دمای سطح پنل است که از رابطه ۴ به دست می‌آید [۱۴].

$$T_C = T_A + [(NOCT - 20)/0.8] \times G_{on} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، T_A دمای محیط است. $NOCT$ نیز به طور معمول در محاسبات در محدوده ۴۲ تا ۴۶ درجه سانتیگراد است. روابط ۱ تا ۴ زمانی کاربرد دارند که نور خورشید به صورت عمود بر صفحه پنل تابیده شود یعنی زاویه تابش ۹۰ درجه باشد. در صورتی که زاویه تابش خورشید بر پنل عمود نباشد، تشعشع دیگر بر صفحه پنل عمود نیست و میزان دریافت تشعشع در این سیستم‌ها تغییر کرده و بر اساس معادله (۵) محاسبه می‌شود.

$$G'_{on} = G_{on} \times \cos(\theta) \quad (۵)$$

θ زاویه تابش می‌باشد که از رابطه ۶ محاسبه می‌شود. منظور از تعیین زاویه نصب بهینه در این مقاله تعیین زاویه پنل‌های فتوولتاییک نسبت به محور شرق-غرب می‌باشد. به‌طور مثال چنانچه ظهر شرعی ساعت ۱۲ باشد چنانچه پنل با زاویه نصب صفر طراحی گردد، در ساعت ۱۲ بیشترین دریافت تابش را خواهد داشت. لازم به ذکر است در حال حاضر نیروگاه‌های فتوولتاییک ثابت عموماً با زاویه نصب صفر طراحی می‌شوند.

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \times \sin(\varphi) \times \cos(\beta) - \sin(\delta) \times \cos(\varphi) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma) \\ & + \cos(\delta) \times \cos(\varphi) \times \cos(\beta) \times \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \times \sin(\varphi) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma) \times \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \times \sin(\beta) \times \sin(\gamma) \times \sin(\omega) \end{aligned} \quad (۶)$$

در رابطه بالا منظور از φ ، عرض جغرافیایی منطقه، ω زاویه ساعت، γ زاویه عزیمت صفحه که برای صفحات رو به جنوب (نیمکره شمالی) صفر می‌شود، β زاویه شیب صفحه و δ زاویه انحراف است که از رابطه (۷) به دست می‌آید.

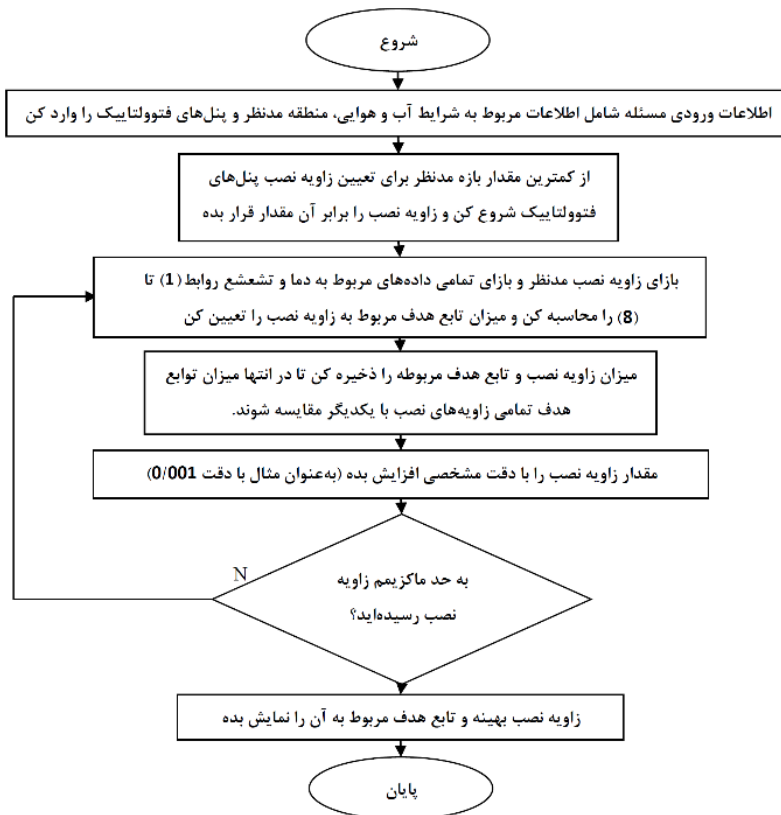
$$\delta = \frac{23.45\pi}{180} \times \sin\left(\frac{360n\pi}{365 \times 180}\right) \quad (۷)$$

در رابطه بالا منظور از n ، شماره روز سال به تاریخ هجری شمسی است. همان‌طور که بیان شد داده‌های ورودی در روابط بالا میزان تشعشع و دمای محیط هستند. زاویه نصب بهینه (α) نیز پارامتری است که مقدار آن می‌بایست توسط الگوریتم بهینه‌سازی تعیین شود تا به زاویه نصب بهینه برای دستیابی به ماکزیمم میزان تولید پنل فتوولتاییک دست یابیم. بنابراین تابع هدف نهایی مسئله در این بخش مطابق رابطه ۸ خواهد بود. قید مسئله نیز در ادامه در رابطه ۹ بیان شده است.

$$\sum_{t=1}^T P_{max.t} \quad (۸)$$

$$-30 \leq \alpha \leq 30 \quad (۹)$$

در رابطه ۸ مجموع میزان توان تولیدی توسط پنل فتوولتاییک در زمان‌های مدنظر مطالعه، محاسبه شده است. در این رابطه $P_{max.t}$ توان تولیدی توسط پنل فتوولتاییک در زمان t و T تعداد کل ساعات مدنظر مطالعه است. رابطه ۹ نیز تعیین‌کننده محدوده زاویه نصب پنل‌های خورشیدی است. همان‌طور که در این رابطه بیان شده است زاویه نصب پنل‌های خورشیدی می‌تواند مقداری بین 30° تا 3° درجه را اختیار کند. فلوجارت حل مسئله در شکل ۱ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است ابتدا داده‌های ورودی مسئله ارائه می‌شوند. این داده‌ها شامل بازه مجاز تغییرات زاویه نصب پنل فتوولتاییک و سایر داده‌های مربوط به مشخصات پنل‌های فتوولتاییک می‌باشند. همچنین داده‌های مربوط به شرایط آب و هوایی نظیر تشعشع و دما و داده‌های مربوط به منطقه مورد نظر نظیر عرض جغرافیایی و موقعیت قرارگیری منطقه در نیمکره شمالی یا جنوبی از دیگر داده‌های ورودی مسئله می‌باشند. پس از واردکردن داده‌های ورودی، حد مینیمم بازه مجاز برای تعیین زاویه نصب پنل فتوولتاییک انتخاب شده و در ادامه با در نظر گرفتن آن و تمامی داده‌های ورودی مربوط به دما و تشعشع، روابط ۱ تا ۸ محاسبه می‌شوند، تا مجموع توان خروجی پنل‌های فتوولتاییک به ازای این زاویه نصب، محاسبه شود. با محاسبه میزان توان خروجی پنل‌های فتوولتاییک در واقع تابع هدف مربوط به این زاویه نصب محاسبه شده است.



شکل ۱. فلوجارت تعیین زاویه نصب بهینه پنل‌ها.

در ادامه مقدار زاویه نصب با دقت مشخصی به عنوان مثال دقت 0.001 افزایش می‌یابد. سپس چک می‌شود که آیا به حد ماکزیمم میزان زاویه نصب برای پنل‌های فتوولتاییک رسیده‌ایم یا خیر. در صورتی که پاسخ منفی باشد برای زاویه

نصب جدید نیز محاسبات انجام شده و تابع هدف محاسبه می‌شود و در صورتی که پاسخ مثبت باشد زاویه نصبی که منجر به بهترین میزان تابع هدف شده باشد به عنوان زاویه نصب بهینه انتخاب می‌شود.

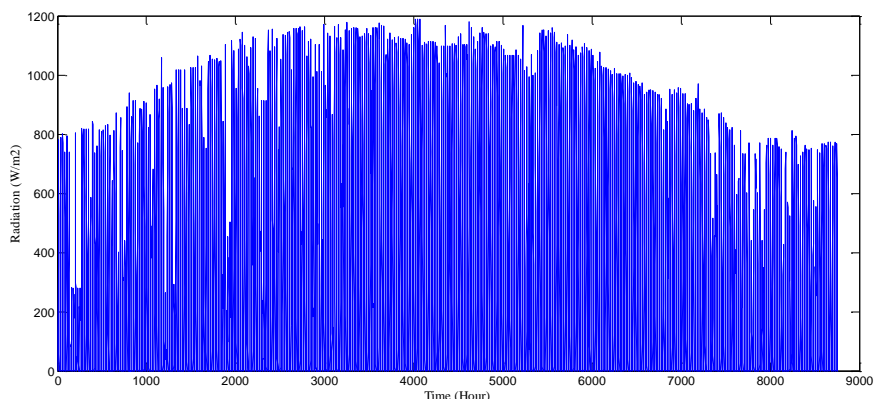
مطالعه موردی

در این بخش مطالعات با دو رویکرد به شرح زیر انجام شده است:

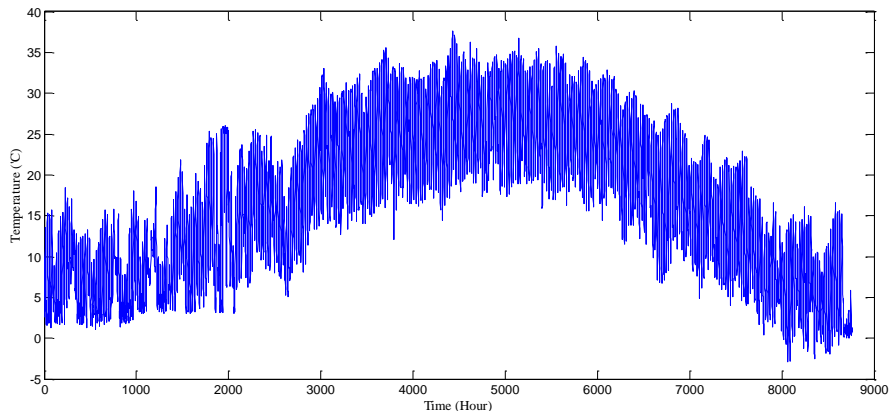
- نصب بهینه پنل‌های فتوولتائیک به منظور دستیابی به بیشترین میزان توان تولیدی در تمامی ساعات سال
- نصب بهینه پنل‌های فتوولتائیک به منظور دستیابی به بیشترین میزان توان تولیدی در ساعات پیک بار روزانه در سال (چهار ساعت پرباری در روز)

هدف از شبیه‌سازی در رویکرد اول این است که مشخص شود در صورتی که هدف بیشینه کردن انرژی تولیدی از پنل‌های فتوولتائیک در طول سال باشد، زاویه نصب بهینه برای این پنل‌ها چه مقدار است. در رویکرد دوم جهت افزایش مشارکت نیروگاه‌های فتوولتائیک در تأمین بار ساعات پیک، زاویه نصب بهینه پنل‌ها به دست آمده است. به عبارتی در این رویکرد بهره‌بردار می‌تواند در ساعات پیک بار که با بیشترین چالش در مورد میزان تلفات شبکه مواجه است، از نیروگاه‌های فتوولتائیک بیشترین استفاده را ببرد. همچنین اگر یک کارخانه صنعتی با دیدگاه استفاده از نیروگاه خود تأمین برای فراهم نمودن بخشی از برق مصرفی خود یک نیروگاه فتوولتائیک با رویکرد دوم نصب کند، می‌تواند در ساعات پیک که برای دریافت توان از شبکه اصلی با محدودیت مواجه است حداکثر استفاده را از نیروگاه فتوولتائیک ببرد.

برای شبیه‌سازی این دو رویکرد نیروگاه فتوولتائیک با قدرت نامی ۳۲۰ کیلووات برای شرایط آب و هوایی شهر کرمان طراحی شده است. عرض جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (شهر کرمان) و ظهر شرعی نیز به ترتیب برابر با $30/2$ درجه و ساعت ۱۲ در نظر گرفته شده است. زاویه شیب پنل نیز برابر با عرض جغرافیایی در نظر گرفته شده و میزان زاویه 7 هم با توجه به این‌که منطقه مورد مطالعه در نیمکره شمالی فرض شده است برابر با صفر در نظر گرفته شده است. میزان تابش و دمای سالیانه شهر کرمان به ترتیب در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود وضعیت تابش در شهر کرمان مطلوب بوده و در بیشتر روزهای سال، تابش بیشتر از 800 وات بر متر مربع را شاهد خواهیم بود.



شکل ۲. منحنی تابش سالیانه در شهر کرمان.



شکل ۳. منحنی دمای سالیانه در شهر کرمان.

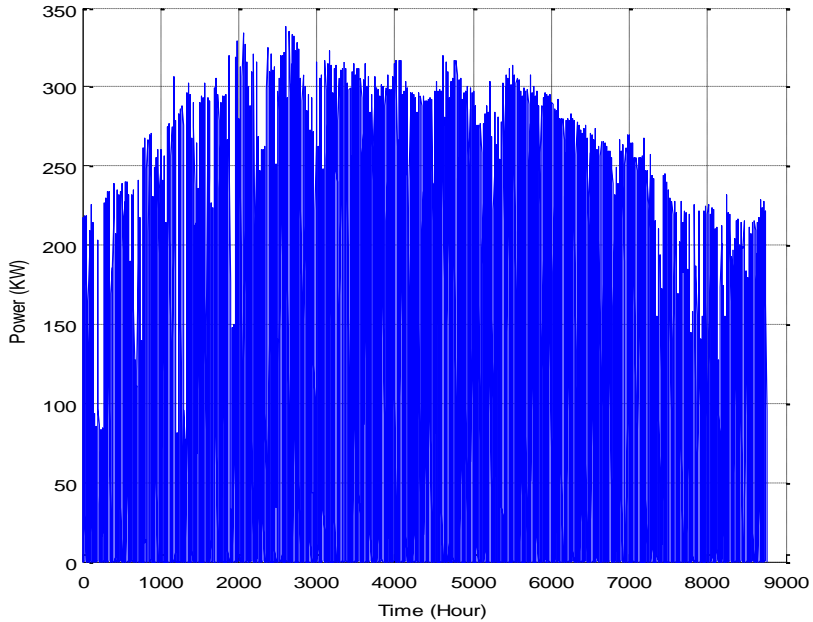
شبیه‌سازی رویکرد اول

همان‌طور که بیان شد در رویکرد اول به دنبال ماکزیم‌سازی مجموع توان تولیدی توسط پنل‌های فتوولتائیک در تمامی ساعات سال هستیم. خروجی انجام محاسبات بر مبنای فلوجارت نشان داده شده در شکل ۱، در جدول ۱ و شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص می‌باشد در رویکرد اول زاویه نصب بهینه برای پنل فتوولتائیک صفر درجه به دست آمده است. مجموع میزان انرژی تولیدی این پنل‌ها در تمامی ساعات سال نیز ۶۷۲۶۳۰ کیلووات محاسبه شده است. همچنین مجموع میزان انرژی تولیدی این پنل‌ها در ساعات پیک بار روزانه در سال نیز ۲۷۳۱۲۵ کیلووات به دست آمده است. میزان انرژی تولیدی این پنل‌ها در تمامی ساعات سال در شکل ۴ و در ۳۶۶ ساعت پیک بار روزانه سال در شکل ۵ ارائه شده است (لازم به ذکر است از آنجا که برای هر روز ۴ ساعت پیک در نظر گرفته شده است لذا کل ساعات پیک روزانه برابر با ۱۴۶۴ ساعت می‌باشد و برای مشاهده بهتر تغییرات توان، در شکل ۵ تنها در ۳۶۶ ساعت پیک بار روزانه انرژی تولیدی نیروگاه نشان داده شده است). همان‌طور که مشاهده می‌شود در بعضی از ساعات می‌توان تولیدی نیروگاه از ظرفیت نامی آن که ۳۲۰ کیلووات بوده فراتر رفته است. علت این امر افزایش تشعشع بیشتر از مقدار استاندارد ۱۰۰۰ وات بر متر مربع بوده و سبب شده است در آن ساعات توانی بیشتر از ظرفیت نامی پنل‌ها تولید گردد.

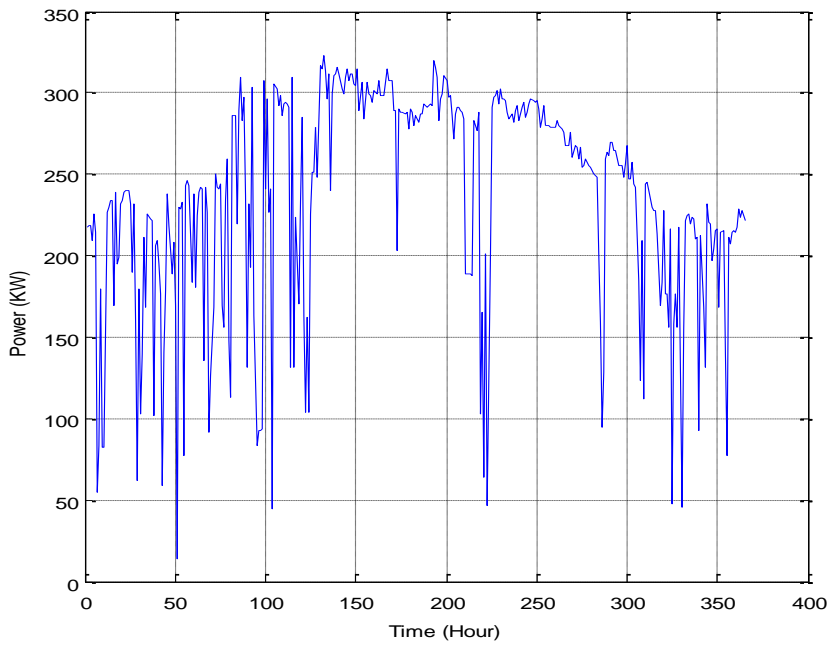
همچنین همان‌طور که در شکل ۴ و خصوصاً در شکل ۵ مشاهده می‌شود در برخی ساعات می‌توان تولیدی پنل‌های فتوولتائیک به میزان زیادی کاهش یافته است. علت این امر را باید در ورودی‌های مسئله یعنی مقادیر تشعشع و دما جست. همان‌طور که از روابط ۱ تا ۶ مشاهده می‌شود هر چه تشعشع در سطح پنل‌های فتوولتائیک کاهش یابد از میزان توان تولیدی آنها نیز کاسته می‌شود. همچنین افزایش دما سبب کاهش تولید پنل‌های فتوولتائیک می‌گردد.

جدول ۱. مشخصات نصب پنل و انرژی خروجی نیروگاه فتوولتائیک بر مبنای رویکرد اول.

مجموع انرژی تولیدی در سال (کیلووات ساعت)	مجموع انرژی تولیدی در ساعات پیک بار روزانه در سال (کیلووات ساعت)	زاویه نصب بهینه پنل فتوولتائیک (درجه)
۶۷۲۶۳۰	۲۷۳۱۲۵	۰



شکل ۴. انرژی تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در تمامی ساعات سال.



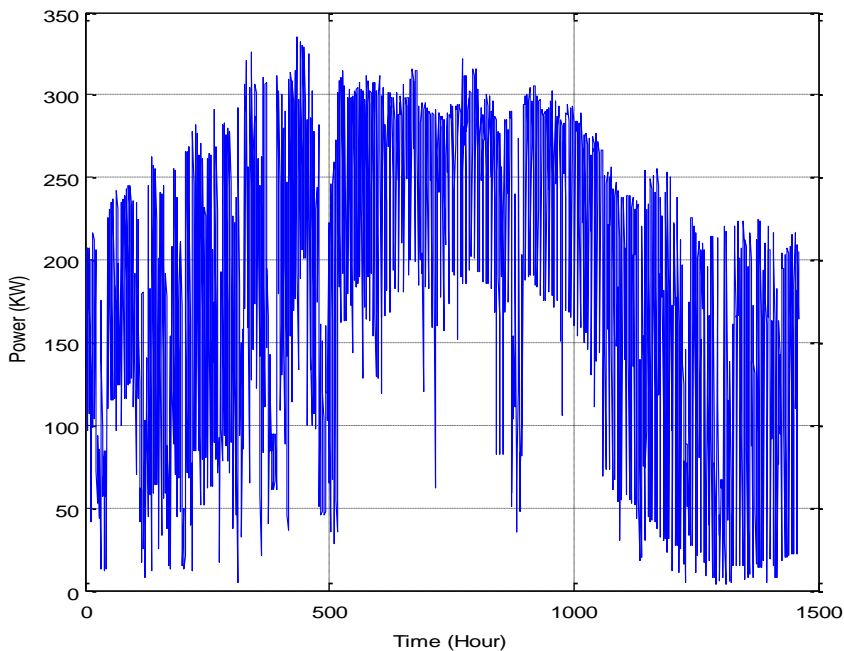
شکل ۵. انرژی تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در ۳۶۶ ساعت پیک بار روزانه در سال.

نتایج شبیه‌سازی رویکرد دوم

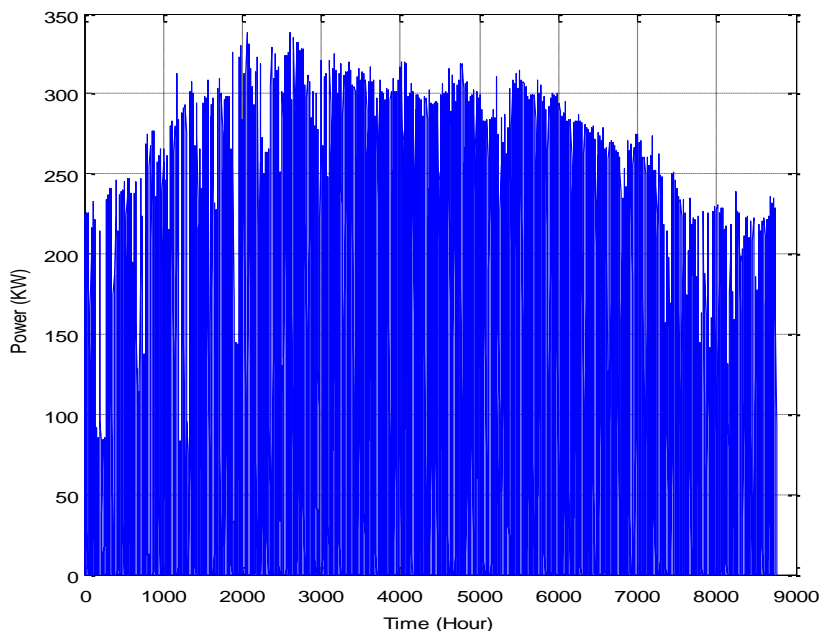
همان‌طور که بیان شد در رویکرد دوم به دنبال بیشینه‌سازی توان تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در ساعات پیک بار روزانه (چهار ساعت پرباری در روز) در سال هستیم. خروجی انجام محاسبات بر مبنای فلوجارت نشان داده شده در شکل ۱ در جدول ۲ و شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشخص می‌باشد در رویکرد دوم زاویه نصب بهینه پنل‌های فتوولتائیک ۶/۶۸ درجه به دست آمده است. به عبارتی چنانچه بخواهیم در ساعات پیک بار در روز بیشینه انرژی تولیدی از نیروگاه فتوولتائیک را دریافت کنیم، باید پنل‌های فتوولتائیک حدود ۷ درجه متمایل به غرب نصب گردند. مجموع میزان انرژی تولیدی این پنل در تمامی ساعات پیک بار روزانه در سال ۲۷۶۰۸۰ کیلووات محاسبه شده است. همچنین مجموع میزان انرژی تولیدی این پنل در تمامی ساعات سال ۶۷۰۱۸۰ کیلووات به دست آمده است. میزان انرژی تولیدی این پنل در تمامی ۱۴۶۴ ساعت پیک بار روزانه در سال در شکل ۶ ارائه شده است (برای هر روز ۴ ساعت پیک بار در نظر گرفته شده است). همچنین میزان انرژی تولیدی این پنل در تمامی ساعات سال نیز در شکل ۷ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات نصب پنل و انرژی خروجی نیروگاه فتوولتائیک بر مبنای رویکرد دوم.

زاویه نصب بهینه پنل فتوولتائیک (درجه)	مجموع انرژی تولیدی در ساعات پیک بار روزانه در سال (کیلووات ساعت)	مجموع انرژی تولیدی در کل ساعات سال (کیلووات ساعت)
۶/۶۸	۲۷۶۰۸۰	۶۷۰۱۸۰

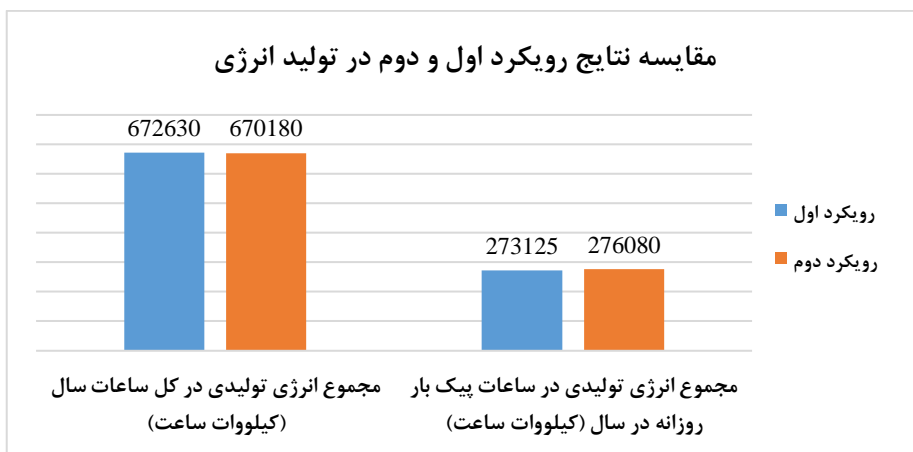


شکل ۶. انرژی تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در ۱۴۶۴ ساعت پیک بار روزانه در سال.



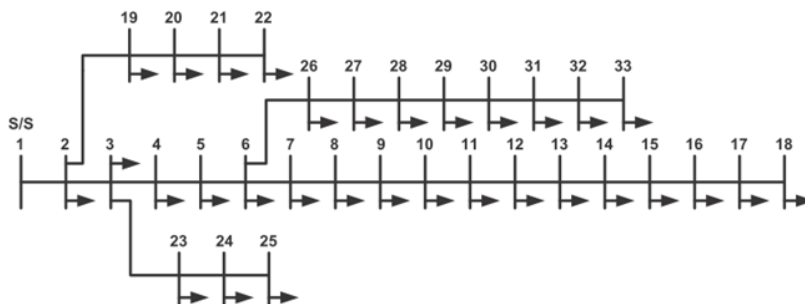
شکل ۷. انرژی تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در تمامی ساعات سال.

در شکل ۸ نتایج دو رویکرد اول و دوم در تولید انرژی مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود در رویکرد دوم میزان انرژی تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در ساعات پیک بار به میزان ۱/۱ درصد افزایش یافته است. همچنین میزان انرژی تولیدی سالیانه رویکرد دوم به اندازه ۰/۳۶ درصد کاهش داشته است.



شکل ۸. مقایسه دو رویکرد اول و دوم در تولید انرژی سالیانه و تولید انرژی در ساعات پیک بار روزانه.

در ادامه به منظور بررسی اثر انتخاب زاویه نصب بهینه بر میزان تلفات شبکه، بر مبنای دو رویکرد مورد نظر نیروگاه فتوولتائیک بر روی شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE [۲۳] احداث شده است. نمودار تک‌خطی این شبکه در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. نمودار تک‌خطی شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE.

با هدف کاهش تلفات در دو رویکرد در نظر گرفته شده محل نصب بهینه نیروگاه فتوولتائیک مشخص گردیده و بر مبنای نتایج شبیه‌سازی باس ۱۸ به عنوان محل نصب بهینه نیروگاه فتوولتائیک ۳۲۰ کیلو واتی در شبکه ۳۳ باسه IEEE به‌دست آمده است. در جدول ۳ میانگین ساعتی تلفات توان شبکه ۳۳ باسه IEEE در کل سال و در ساعات پیک قبل از احداث نیروگاه فتوولتائیک نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود میزان تلفات شبکه در ساعات پیک به‌طور متوسط حدود دو برابر دیگر ساعات بوده است و این موضوع اهمیت کاهش تلفات در ساعات پیک را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین میانگین ساعتی تلفات توان شبکه ۳۳ باسه IEEE در کل سال و در ساعات پیک با احداث نیروگاه فتوولتائیک بر مبنای رویکرد اول و دوم به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد چنانچه نیروگاه فتوولتائیک بر مبنای رویکرد اول احداث گردد، میانگین ساعتی تلفات توان شبکه ۳۳ باسه IEEE در کل سال و در ساعات پیک به ترتیب حدود ۳/۳ و ۲/۱ درصد کاهش یافته است. همچنین چنانچه نیروگاه فتوولتائیک بر مبنای رویکرد دوم احداث گردد، میانگین ساعتی تلفات توان شبکه ۳۳ باسه IEEE در کل سال و در ساعات پیک به ترتیب حدود ۶/۷ و ۷/۴ درصد کاهش یافته است.

جدول ۳. میانگین ساعتی تلفات توان شبکه ۳۳ باسه IEEE قبل از احداث نیروگاه فتوولتائیک.

میانگین ساعتی تلفات توان در ساعات پیک بار (کیلووات ساعت)	میانگین ساعتی تلفات توان در کل ساعات سال (کیلووات ساعت)
۱۵/۸۸۴۶	۸/۲۳۵۱

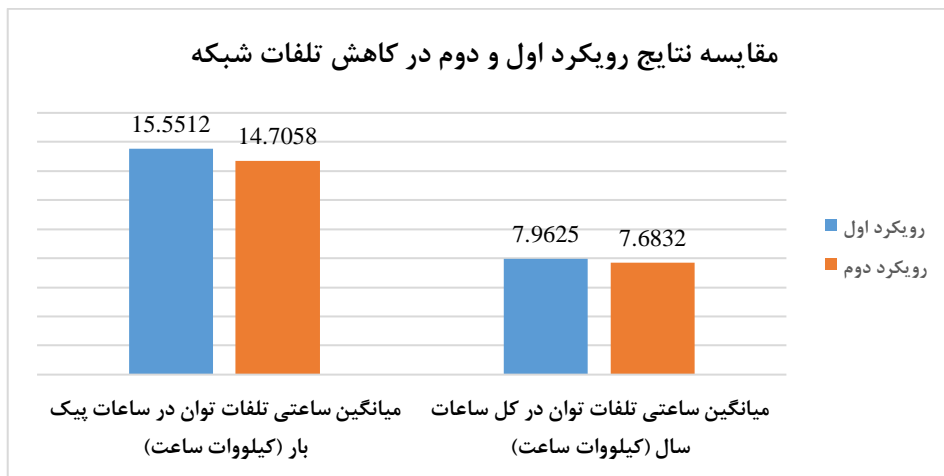
جدول ۴. میانگین ساعتی تلفات توان شبکه ۳۳ باسه IEEE با در نظر گرفتن رویکرد اول در احداث نیروگاه فتوولتائیک.

میانگین ساعتی تلفات توان در ساعات پیک بار (کیلووات ساعت)	میانگین ساعتی تلفات توان در کل ساعات سال (کیلووات ساعت)
۱۵/۵۵۱۲	۷/۹۶۲۵

جدول ۵. میانگین ساعتی تلفات توان شبکه ۳۳ باسه IEEE با در نظر گرفتن رویکرد دوم در احداث نیروگاه فتوولتائیک.

میانگین ساعتی تلفات توان در ساعات پیک بار (کیلووات ساعت)	میانگین ساعتی تلفات توان در کل ساعات سال (کیلووات ساعت)
۱۴/۷۰۵۸	۷/۶۸۳۲

در شکل ۱۰ نتایج دو رویکرد اول و دوم در کاهش تلفات مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود چنانچه نیروگاه فتوولتائیک بر مبنای رویکرد دوم احداث گردد تأثیر بیشتری در کاهش تلفات توان داشته و تلفات توان حدود ۳/۵ درصد بیشتر از رویکرد اول کاهش یافته است. این موضوع نشان دهنده تأثیر زاویه نصب پنل ها در میزان کاهش تلفات شبکه و به تبع آن رضایت مندی بهره بردار شبکه می باشد.



شکل ۱۰. مقایسه دو رویکرد اول و دوم در میانگین ساعتی تلفات توان در کل سال و ساعات پیک بار روزانه.

نتیجه گیری

در این مقاله جهت امکان سنجی استفاده بیشتر از پتانسیل نیروگاه های فتوولتائیک در ساعات پیک بار، دو رویکرد جهت طراحی نیروگاه فتوولتائیک در نظر گرفته شده است. در رویکرد اول زاویه نصب پنل فتوولتائیک (زاویه پنل نسبت به محور شرق به غرب) با هدف بیشینه سازی مجموع انرژی تولیدی پنل فتوولتائیک در تمام ساعات سال تعیین گردید. در رویکرد دوم زاویه نصب با هدف بیشینه سازی مجموع انرژی تولیدی پنل فتوولتائیک در ساعات پیک بار روزانه در طول سال تعیین گردید. نتایج مقاله نشان می دهد چنانچه خواهیم در منطقه مورد نظر بیشترین مشارکت نیروگاه فتوولتائیک در بار پیک رخ دهد باید پنل های فتوولتائیک حدود ۷ درجه متمایل به غرب نصب گردند. در این حالت میزان تولید نیروگاه در ساعات پیک حدود ۱.۱ درصد افزایش یافته است. همچنین نتایج مقاله نشان می دهد چنانچه احداث نیروگاه فتوولتائیک بر مبنای رویکرد دوم صورت گیرد، نیروگاه فتوولتائیک تأثیر بیشتری در کاهش تلفات شبکه خواهد داشت. نتایج نشان می دهد چنانچه یک نیروگاه فتوولتائیک ۳۲۰ کیلو واتی در شبکه ۳۳ باسه IEEE بر مبنای رویکرد دوم نصب گردد، می تواند میزان تلفات توان شبکه ۳۳ باسه IEEE را حدود ۳.۵ درصد بیشتر از حالتی که نیروگاه بر مبنای رویکرد اول نصب گردیده کاهش دهد.

References

- [1] Hosseini, A., Hedayati, M., & Khaledian, A. (2022). Multi-Objective Planning of Distributed Generation in the Electricity Network Considering the Interests of the Resource Investor and Network Operator. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(3), 279-303. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.328036.1988>
- [2] Yu, J., Tang, Y. M., Chau, K. Y., Nazar, R., Ali, S., & Iqbal, W. (2022). Role of solar-based renewable energy in mitigating CO2 emissions: Evidence from quantile-on-quantile estimation. *Renewable Energy*, 182, 216-226. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.002>
- [3] Tang, Y., Burgos, R., Li, C., & Boroyevich, D. (2016, June 27-30). *Impact of PV inverter penetration on voltage profile and power loss in medium voltage distribution systems*. 2016 Institute of Electrical and Electronics Engineers 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics Trondheim, Norway. <https://doi.org/10.1109/CMPPEL.2016.7556710>
- [4] Cohen, M. A., & Callaway, D. S. (2016). Effects of distributed PV generation on California's distribution system, Part 1: Engineering simulations. *Solar Energy*, 128, 126-138. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.002>
- [5] Karimi, M., Mokhlis, H., Naidu, K., Uddin, S., & Bakar, A. H. A. (2016). Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 594-605. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.042>
- [6] Sharma, V., Aziz, S. M., Haque, M. H., & Kauschke, T. (2020). Effects of high solar photovoltaic penetration on distribution feeders and the economic impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110021>
- [7] Thomson, M., & Infield, D. (2007). Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems. *Institution of Engineering and Technology Renewable Power Generation*, 1(1), 33-40. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg:20060009>
- [8] Daud, S., Kadir, A. F. A., & Gan, C. K. (2015, December 13-14). *The impacts of distributed Photovoltaic generation on power distribution networks losses*. 2015 IEEE Student Conference on Research and Development, Kuala Lumpur, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2015.7449305>
- [9] Sa'ed, J. A., Amer, M., Bodair, A., Baransi, A., Favuzza, S., & Zizzo, G. (2018, June 12-15). *Effect of Integrating Photovoltaic Systems on Electrical Network Losses Considering Load Variation*. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, Palermo, Italy. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8494433>
- [10] Chen, Y., Quan, M., Wang, D., Du, H., Hu, L., Zhao, Y., Guo, M., & Liu, Y. (2022). Optimization and comparison of multiple solar energy systems for public sanitation service buildings in Tibet. *Energy Conversion and Management*, 267, 115847. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115847>
- [11] Kumar, G. B. A., & Shivashankar. (2022). Optimal power point tracking of solar and wind energy in a hybrid wind solar energy system. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 13(1), 77-103. <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00399-9>
- [12] Rajaeian, A., Zeinali Davarani, R., & Rajaeian, E. (2020). Investigation the Effect of Inverter Power Clipping Losses on the Efficiency of Photovoltaic Power Plants. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 17(2), 43-51. <http://jiaee.com/article-1-667-en.html>

- [13] Derakhshan Nia, Sh., Shakiba, M., & Shakiba, M. (2022). Modeling and Analysis of Two-junction Direct Bandgap Solar Cell Based on Ensemble Monte Carlo Algorithm. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 19(2), 139-148. <https://doi.org/10.52547/jiaeee.19.2.139>
- [14] Modarresi, J., Gholipour, E., & Nasri, M. H. (2016). Extraction of General Models for Optimum Tilt Angles to Recieve Maximum Radiation: Iran Case Study. *Iranina journal of Energy*, 18(3), 145-160. <https://necjournals.ir/article-1-705-en.html>
- [15] Francisco, D., Pedro, D., & Luis, C. (2010, March 23-25). *Two axis solar tracker based on solar maps, controlled by a low-power microcontroller*. Proceeding of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granda, Spain. <https://www.icrepq.com/icrepq'10/343-Duarte.pdf>
- [16] Capdevila, H., Herreras, M., & Marola, A. (2014). Anisotropic Diffuse Shading Model for Sun-tracking Photovoltaic Systems. *Energy Procedia*, 57, 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.018>
- [17] Loschi, H., Ferrarezi, R., Rocha, N., Silva, A., & Iano, Y. (2014). Solar tracking system installed with photovoltaic (PV) panels to connection grid tie low voltage (sunflower). *Energy and Power Engineering*, 4(3), 49-53. <https://doi.org/10.5923/j.ep.20140403.01>
- [18] Michael, J. J., Iniyan, S., & Goic, R. (2015). Flat plate solar photovoltaic-thermal (PV/T) systems: A reference guide. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 62-88. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.022>
- [19] Mitrofanov, S. V., & Baykasenov, D. K. (2020, May 18-22). *To the Issue of Increasing the Energy Efficiency of Photovoltaic Installations*. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, Sochi, Russia. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111985>
- [20] Rezagholizadeh, E., & Batenipour, N. (2020). Improving the Efficiency and the Cost of Energy Production in Photovoltaic Systems Using Smart Tracking Mechanism. *Journal of Information and Communication Technology in Policing*, 1(3), 59-71. <https://www.sid.ir/paper/385736/en>
- [21] Pawar, P., Pawale, P., Nagthane, T., Thakre, M., & Jangale, N. (2021). Performance enhancement of dual axis solar tracker system for solar panels using proteus ISIS 7.6 software package. *Global Transitions Proceedings*, 2(2), 455-460. <https://doi.org/10.1016/j.gltip.2021.08.049>
- [22] Ponce-Jara, M. A., Velásquez-Figueroa, C., Reyes-Mero, M., & Rus-Casas, C. (2022). Performance Comparison between Fixed and Dual-Axis Sun-Tracking Photovoltaic Panels with an IoT Monitoring System in the Coastal Region of Ecuador. *Sustainability*, 14(3), 1696. <https://doi.org/10.3390/su14031696>
- [23] Li, X., Li, B., Jiang, T., Li, F., Zhang, R., & Chen, H. (2022). *Modified Ieee 33-Bus And 123-Bus Ac-Dc Hybrid Test Systems* [Data set]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Dataport. <https://dx.doi.org/10.21227/fcsp-f683>