# شبیه‌سازی و ارزیابی پتانسیل خورشیدی تهران، کرمان و یزد برای احداث نیروگاه فتوولتاییک ۵۰۰ کیلوواتی با استفاده از نرم‌افزار PVsyst

علی بدری [۱]، رضا عمادی‌فر [۲]، سما وفایی [۳]، مجتبی الدرمی [۴]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۷/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۱/۱۰

**چکیده:**
با افزایش نگرانی‌ها در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای و دیگر مسائل زیست‌محیطی، استفاده از فناوری‌های نوینی نظیر انرژی خورشیدی به‌طور فزاینده‌ای برای تولید برق توصیه شده است. در این مقاله، یک نمونه نیروگاه خورشیدی ۵۰۰ کیلوواتی متصل به شبکه توسط نرم‌افزار PVsyst شبیه‌سازی و عملکرد آن در شرایط متفاوت آب و هوایی موردبررسی و ارزیابی قرارگرفته است. همچنین ضریب عملکرد و انواع تلفات انرژی (مانند تلفات تبدیل انرژی، تلفات شبکه داخلی، تلفات الکترونیک قدرت(مبدل‌ها) ) محاسبه شده است. در انتها، میزان انرژی تولیدی و تزریقی به شبکه و درآمد سالانه حاصل از آن برای احداث در جنوب تهران، کرمان و یزد مقایسه شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، شهر یزد از بین دو شهر دیگر به‌عنوان سایت بهینه برای احداث این نیروگاه شناخته‌شده است.

**کلمات کلیدی:**
سلول فتوولتاییک، سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه، شبیه‌سازی، نرم‌افزار PVsyst، نیروگاه فتوولتاییک

۱) استادیار گروه برق قدرت دانشکده مهندسی برق دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران a_badri73@yahoo.com
۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول) rezaemadifar@mail.com
۳) دانش‌آموخته مهندسی برق- قدرت دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران starlit.sky45@yahoo.com
۴) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق دانشگاه تبریز m.eldoromi92@ms.tabrizu.ac.ir

**مقدمه**

سیستم فتوولتاییک شامل آرایه‌های فتوولتاییک، باتری و دیگر تجهیزات الکترونیک قدرت مانند انواع مبدل‌ها و ... می‌باشد. سیستم فتوولتاییک انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی جریان مستقیم تبدیل می‌کنند. اگر این سیستم برای بارهای متناوب مورد استفاده قرار گیرد، به مبدل الکترونیک قدرت DC به AC نیاز خواهد بود. سیستم‌های فتوولتاییک می‌توانند در دو نوع متصل به شبکه و یا مستقل از شبکه باشند. سیستم‌های متصل به شبکه مستقیما انرژی الکتریکی را به شبکه برق تزریق می‌کنند و در موازات دیگر منابع تولید انرژی الکتریکی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. سیستم‌های فتوولتاییک متصل به شبکه، انرژی الکتریکی پاک را در نزدیکی بار(مصرف‌کننده) و بدون تلفات انتقال و توزیع و بدون نیاز به باتری تولید می‌کنند. بهره‌وری و عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک متصل به شبکه به شرایط آب و هوایی منطقه، جهت و زاویه قرار گرفتن آرایه‌های فتوولتاییک و بازده اینورتر وابسته می‌باشد درحالی‌که سیستم‌های مستقل از شبکه با شبکه برق تعاملی نداشته و توان تولیدی آن مستقیما به بار و مصرف‌کننده تزریق می‌شود. در این سیستم‌ها آرایه فتوولتاییک مستقیما به بار(مصرف‌کننده) متصل نمی‌شود بلکه نیازمند تجهیزات ذخیره‌سازی می‌باشد[۱۰]. بانک باتری انرژی الکتریکی را هنگامی‌که توان تزریقی آرایه فتوولتاییک بیشتر از تقاضای بار می‌باشد در خود ذخیره می‌کند و زمانی که توان تولیدی آرایه فتوولتاییک کمتر از تقاضاست، به بار تحویل دهد. سیستم‌های مستقل از شبکه معمولا به‌منظور تولید برق برای مصارف خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد[۶].

طیف گسترده‌ای از ابزارها برای بررسی و ابعاد گزینی سیستم‌های فتوولتاییک متصل به شبکه و مستقل از شبکه وجود دارند. طراحان و مجریان سیستم‌ها از ابزارهای ساده‌ای برای ابعاد گزینی سیستم‌های فتوولتاییک استفاده می‌کنند. اغلب پژوهشگران و مهندسان بیشتر درگیر ابزارهای شبیه‌سازی هستند که معمولا به‌منظور بهینه‌سازی سیستم‌ها از آن استفاده می‌کنند. ابزارهای نرم‌افزاری مربوط به سیستم‌های فتوولتاییک را می‌توان به ابزار تجزیه‌وتحلیل امکان‌سنجی، ابعادگزینی و شبیه‌سازی طبقه‌بندی کرد. PVsyst یک بسته نرم‌افزاری برای سیستم‌های فتوولتاییک و طراحی نیروگاه‌های فتوولتاییک می‌باشد که توسط دانشگاه ژنو توسعه داده شده است. این نرم‌افزار با ادغام ابزارهای موردنیاز برای ابعاد گزینی، امکان‌سنجی و شبیه‌سازی سیستم‌های فتوولتاییک، یک نرم‌افزار جامع و بسیار مفید برای پژوهشگران و مهندسان به‌حساب می‌آید. در این نرم‌افزار، بعد از تعریف منطقه و میزان تقاضا، کاربر اجزای مختلف سیستم را با توجه به مشخصات فنی آن‌که توسط کارخانه سازنده آن منتشرشده و در کتابخانه نرم‌افزار موجود است، انتخاب کرده و نرم‌افزار به‌صورت اتوماتیک تعداد و ابعاد آنها را متناسب با توان سیستم موردنیاز محاسبه می‌کند. اطلاعات خورشیدی برحسب طول و عرض جغرافیایی تفکیک‌شده و در نرم‌افزار PVsyst دسترسی به آنها امکان‌پذیر می‌باشد[۴]،[۱۲]. درصورتی‌که این اطلاعات در کتابخانه نرم‌افزار موجود نباشد، می‌توان با استفاده از نرم‌افزار Meteonorm این اطلاعات را وارد نرم‌افزار

PVsyst کرده و از آن برای شبیه‌سازی استفاده کرد. در نرم‌افزار PVsyst تجزیه‌و تحلیل و برآورد اقتصادی و مالی احداث سیستم نیز امکان‌پذیر می‌باشد. ماژول و اینورتر مهم‌ترین اجزای سیستم‌های فتوولتاییک متصل به شبکه هستند. با توجه به بالا بودن هزینه اولیه احداث نیروگاه‌های فتوولتاییک، طراحی بهینه اجزای اصلی نیروگاه‌ها و مکان‌یابی بهینه برای احداث با در نظر گرفتن مسائل مالی، قابلیت اطمینان و استفاده بهینه از مساحت زمین نیروگاه‌ها امری ضروری است.

مقالات بسیاری به بررسی نظریه نیروگاه خورشیدی و شبیه‌سازی و محاسبه توان خروجی آن پرداخته‌اند. در این خصوص، در [۲] ابعاد گزینی بهینه برای آرایش ماژول‌ها صورت گرفته ولی ابعاد گزینی برای اینورتر انجام‌نشده است؛ مرجع [۳] به ابعاد گزینی اجزای نیروگاه فتوولتاییک از طریق الگوریتم ژنتیک پرداخته است؛ در [۷] بهینه‌سازی ظرفیت تجهیزات با روش شبکه عصبی برای نیروگاه فتوولتاییک مستقل از شبکه انجام‌شده است و بسیاری از مقالات نظیر [۵] و [۹] به افزایش بهره‌وری نیروگاه فتوولتاییک از طریق بهبود الگوریتم ردیابی نقطه توان بیشینه پرداخته‌اند. در این میان، [۱] با استفاده از نرم‌افزار Pvsyst به مطالعه و طراحی بهینه یک نیروگاه فتوولتاییک ۱۰۰کیلوواتی در تهران پرداخته و بر روی ابعاد گزینی ماژول‌ها و اینورترها تمرکز کرده است. در [۸] نیز امکان‌سنجی اقتصادی و برآورد هزینه تعمیر نگهداری استفاده از انرژی خورشیدی توسط نرم‌افزار PVsyst در دولت کویت مورد بررسی قرارگرفته و نشان داده‌شده است که با استفاده از سیستم‌های فتوولتاییک، منابع مورداستفاده برای تولید برق به روش سنتی و هزینه انتشار گاز $CO_2$ ذخیره می‌شود.

در این مقاله، بیشتر جنبه مکان‌یابی بهینه برای احداث نیروگاه خورشیدی مدنظر بوده و بیشتر بر روی تأثیر شرایط آب و هوایی و میزان شدت تابش خورشیدی جهت مکان‌یابی بهینه برای استفاده از سیستم‌های فتوولتاییک تمرکز شده است. برای این منظور، با استفاده از روش‌های ارائه شده در [۱] با انتخاب و ابعاد گزینی بهینه اجزای سیستم فتوولتاییک، یک نیروگاه ۵۰۰ کیلوواتی برای احداث در شهرهای تهران، کرمان و یزد توسط نرم‌افزار PVsyst6.25 شبیه‌سازی شده و میزان انرژی تولیدی، ضریب عملکرد، بازدهی و انرژی تزریقی به شبکه و درآمد سالانه حاصل از آن در این شهرها موردبحث و بررسی قرارگرفته است. نمودارها و جداول مربوط به شبیه‌سازی که در بخش بعدی مقاله ارائه خواهند شد، در طول فرایند شبیه‌سازی به‌دست‌آمده‌اند.

### شرایط جغرافیایی مکان‌های مورد مطالعه برای احداث نیروگاه

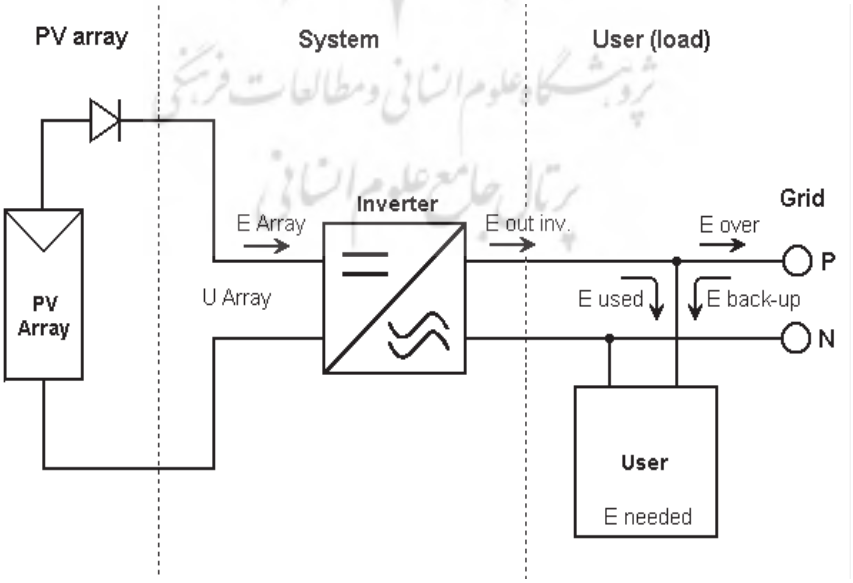
جدول (۱) شرایط جغرافیایی ۳ منطقه در نظر گفته‌شده را نشان می‌دهد. اطلاعات جدول (۱) به‌عنوان ورودی برای دریافت جزئیات شدت تابش خورشیدی در مکان‌های مربوطه به نرم‌افزار داده می‌شوند. اما همان‌طور که اشاره شد، به دلیل اینکه اطلاعات جغرافیایی و شرایط آب و هوایی مناطق موردنظر در نرم‌افزار PVsyst6.25 موجود نبود، در این مقاله از نرم‌افزار Meteonorm برای دریافت این اطلاعات استفاده‌شده است [۱۱].

**جدول ۱) اطلاعات جغرافیایی**

| منطقه | عرض جغرافیایی | طول جغرافیای | ارتفاع از سطح دریا |
|---|---|---|---|
| تهران | ۳۵,۴ ° $N$ | ۵۱,۲° E | ۱۱۰۰ $m$ |
| کرمان | ۳۰,۳° $N$ | ۵۷,۰° E | ۱۷۰۰ $m$ |
| یزد | ۳۱,۹ ° $N$ | ۵۴,۵° E | ۱۲۳۰ $m$ |

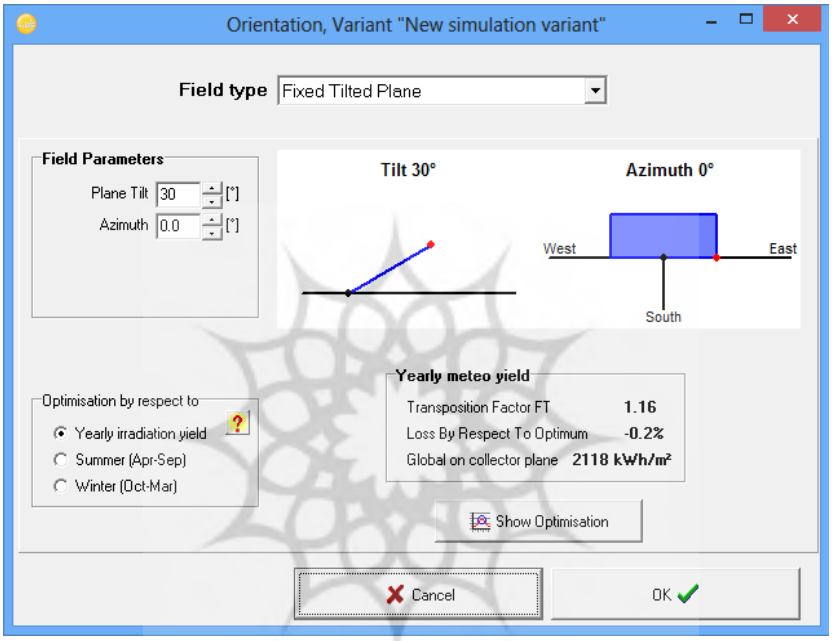
## سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه

در این بخش، یک نیروگاه خورشیدی ۵۰۰کیلوواتی برای نصب در یکی از شهرهای تهران، کرمان و یزد در نرم‌افزار PVsyst شبیه‌سازی و ازنظر میزان انرژی تولیدی و برآورد اقتصادی موردبررسی و مقایسه قرارگرفته است. علت انتخاب ظرفیت ۵۰۰ کیلوواتی، ملاحظات فنی شبکه برق در مناطق مذکور می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های نیروگاه‌های خورشیدی و تأثیرات نامطلوب آن بر سیستم‌های حفاظتی شبکه‌های توزیع و انتقال، تعیین ظرفیت بر اساس ساختار شبکه محلی و زیرساخت‌های حفاظتی آن صورت گرفته است. شکل (۱) مدل یک سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه سیستم‌های نصب‌شده و آرایش آنها برای هر سه منطقه تهران، کرمان و یزد یکسان در نظر گرفته‌شده است، جداول و شکل‌هایی که در ادامه آورده می‌شوند فقط مراحل طراحی سایت تهران می‌باشند.




**شکل ۱) سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه**

شکل (۲) جهت و زاویه نصب پنل‌های خورشیدی را در منطقه تهران نشان می‌دهد. زاویه شیب آرایه‌های فتوولتاییک به‌منظور دریافت بیشترین شدت تابش خورشیدی برابر با عرض جغرافیایی منطقه قرار داده می‌شوند[۳]،[۷]. بنابراین، زاویه بهینه برای منطقه تهران(۳۵,۴) بوده که با توجه به تجهیزات موجود در بازار و به‌منظور کاهش هزینه‌ها، ۳۰ درجه در نظر گرفته می‌شود.




**شکل ۲) جهت و زاویه نصب پنل ها**

## پارامترها و مشخصات سیستم

اطلاعات زیر مربوط به سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه در سایت تهران می‌باشد.

### الف) مشخصات سیستم

جدول (۲) مشخصات سیستم را نشان می‌دهد که در آن، یک نوع پنل استاندارد با فناوری ساخت مونوکریستال برای همه مناطق به کار گرفته شده است.

**جدول ۲) مشخصات سیستم**

| | |
|---|---|
| نوع پنل | استاندارد |
| فناوری ساخت | مونوکریستال |

**ب) مشخصات آرایه‌های فتوولتاییک**

جدول (۳) آرایه‌های فتوولتاییک را تعریف می‌کند که در آن، توان نامی ۴۹۶ کیلووات ـ اوج مصرف و مشخصات بار آن سیستم متصل به شبکه می‌باشد.

**جدول ۳) مشخصات آرایه‌های فتوولتاییک**

| | |
|---|---|
| توان نامی | ۴۹۶kWp |
| مشخصات بار | شبکه |

***ج) خلاصه مشخصات کل سیستم***

جدول (۴) خلاصه‌ای از مشخصات کل سیستم را نشان می‌دهد. تعداد پنل‌های موردنیاز برای احداث یک نیروگاه ۵۰۰ کیلوواتی برابر ۱۸۳۶ عدد و مساحت موردنیاز برای احداث آن ۳۰۱۱ مترمربع می‌باشد. همچنین ۱۸ عدد اینورتر نیز موردنیاز است.

**جدول ٤) خلاصه مشخصات کل سیستم**

| | |
|---|---|
| تعداد پنل‌ها | ۱۸۳۶ عدد |
| مساحت موردنیاز | ۳۰۱۱ مترمربع |
| تعداد اینورترها | ۱۸ عدد |
| توان نامی هر پنل | ۲۷۰ وات–پیک |
| توان نامی کل پنل‌ها | ۴۹۶ کیلووات–پیک |
| توان نامی متناوب(AC) | ۴۸۶ کیلووات |

***د) انتخاب پنل و اینورتر مناسب***

جدول (۵) مشخصات و جزئیات پنل و جدول (۶) مشخصات اینورتر مورداستفاده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

**جدول ۵) مشخصات پنل‌های فتوولتاییک**

| | |
|---|---|
| توان نامی هر پنل | ۲۷۰Wp |
| ولتاژ نامی هر پنل | ۲۷ V |
| ولتاژ نقطه توان حداکثر در دمای ۶۰ °C | ۲۶٫۵V |
| ولتاژ مدارباز در دمای ۱۰- °C | ۴۲٫۹ V |

**جدول ٦) مشخصات اینورتر**

| | |
|---|---|
| اینورتر | Solargate PV7M033NN |
| توان نامی | ۲۷ Kw |
| محدوده ولتاژ کاری | ۳۲۰-۶۳۰ V |

***ه) شرایط بهره‌برداری***

جدول (۷) مشخصات سیستم در شرایط بهره‌برداری از آن را نشان می‌دهد.

**جدول ۷) شرایط بهره‌برداری**

| | |
|---|---|
| کل توان پنل‌ها در شرایط بهره‌برداری ( ۵۰° C ) | ۴۴۴ kWp |
| ولتاژ نقطه توان حداکثر در دمای ( ۵۰° C ) | ۴۷۳ V |
| ولتاژ نقطه توان حداکثر در دمای ( ۵۰° C ) | ۹۳۹ A |

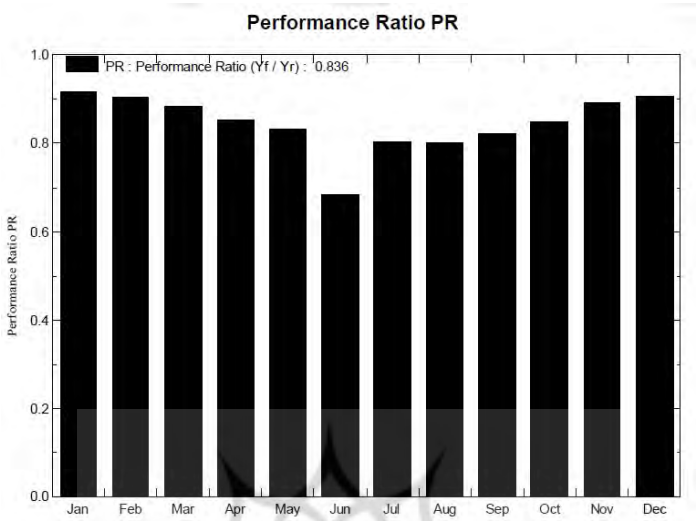
## نتایج شبیه سازی

این پژوهش کاملا بر مبنای نرم‌افزار PVsyst می‌باشد و در این مقاله برای شبیه‌سازی سیستم موردنظر از این نرم‌افزار استفاده شده است. تمامی شکل‌ها و جداول که در این بخش ارائه شده‌ها مربوط به شبیه‌سازی سیستم فتوولتاییک برای منطقه تهران می‌باشد. ازآنجایی‌که این مقاله یک مدل‌سازی محاسباتی را ارائه می‌دهد، فقط نتایج شبیه‌سازی به‌جای شرح و توصیف آن نشان داده شده است.

ضریب عملکرد (PR) برابر با نسبت عملکرد نهایی سیستم فتوولتاییک ( $Y_f$ ) و عملکرد مرجع ( $Y_r$ ) می‌باشد[۷].

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \qquad (۱)$$

شکل (۳) ضریب عملکرد سیستم متصل به شبکه در منطقه تهران را نشان می‌دهد که در آن میانگین ضریب عملکرد سالانه برابر ۰،۸۳۷ می‌باشد.




**شکل ۳) میانگین ضریب عملکرد (PR)**

شکل (۴) رویدادهای آب و هوایی و انرژی سیستم فتوولتاییک را نشان می‌دهد. میزان شدت تابش کلی (GlobIrrad) برای تهران برابر ۱۸۲۶٫۹ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال و شدت تابش غیرمستقیم (Diffuse) برابر ۶۱۰٫۸ کیلووات ساعت بر مترمربع می‌باشد.

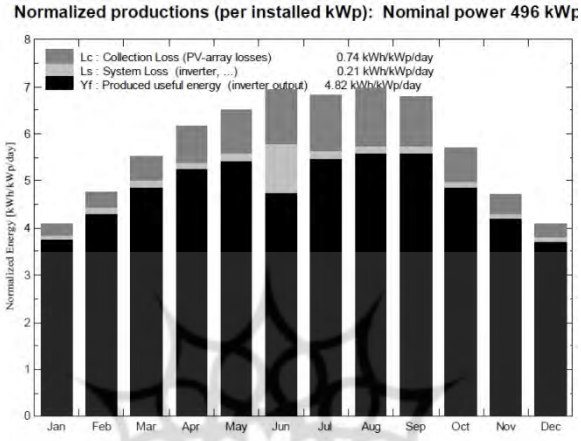
Site: **Teheran NE (Iran)**

Data source: MeteoNorm 6.1 station

| | Global Irrad. kWh/m².mth | Diffuse kWh/m².mth | Temper. °C | Wind Vel. m/s |
|---|---|---|---|---|
| January | 81.0 | 30.1 | -0.1 | 1.84 |
| February | 97.3 | 37.1 | 2.2 | 2.59 |
| March | 141.1 | 54.1 | 6.9 | 2.99 |
| April | 173.2 | 64.6 | 13.0 | 3.27 |
| May | 208.5 | 73.4 | 18.2 | 3.29 |
| June | 223.6 | 75.5 | 23.7 | 2.96 |
| July | 222.7 | 70.0 | 26.1 | 2.82 |
| August | 209.3 | 63.1 | 26.2 | 2.35 |
| September | 173.4 | 46.6 | 21.6 | 2.22 |
| October | 131.1 | 41.2 | 15.5 | 2.11 |
| November | 91.4 | 31.3 | 7.2 | 1.83 |
| December | 74.3 | 23.7 | 2.7 | 1.57 |
| **Year** | **1826.9** | **610.8** | **13.6** | **2.5** |

**شکل ٤) شرایط آب و هوایی**

شکل (۵) جزئیات میانگین ماهانه تلفات سیستم را برحسب کیلووات ساعت نشان می‌دهد. تلفات آرایه‌های فتوولتاییک ۰,۷۴ و تلفات سیستم شامل اینورتر و... برابر ۰,۲۱ کیلووات ساعت بر کیلووات پیک بر روز می‌باشد. مجموع انرژی مفید قابل‌دسترس در خروجی اینورتر برابر ۴,۸۲ کیلووات ساعت بر کیلووات پیک بر روز می‌باشد.




**شکل ۵) میانگین ماهانه تلفات و انرژی تولیدی**

افقی سالانه برابر ۱۸۲۶,۹ کیلووات بر مترمربع، مجموع انرژی ناشی از رویدادها بر روی پنل‌های فتوولتاییک برابر ۲۱۰۳,۱ کیلووات ساعت بر مترمربع و انرژی قابل‌دسترس در خروجی آرایه‌های فتوولتاییک برابر ۹۰۸,۸۴ کیلووات ساعت می‌باشد. انرژی تزریقی به شبکه برابر ۸۷۱,۵۵ کیلووات ساعت و میانگین سالانه بازدهی سیستم ۱۴,۳۵ درصد می‌باشد. میانگین دمای محیط نیز برابر ۱۳,۶۶ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

**جدول ۸) توازن و نتایج اصلی سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه در تهران**

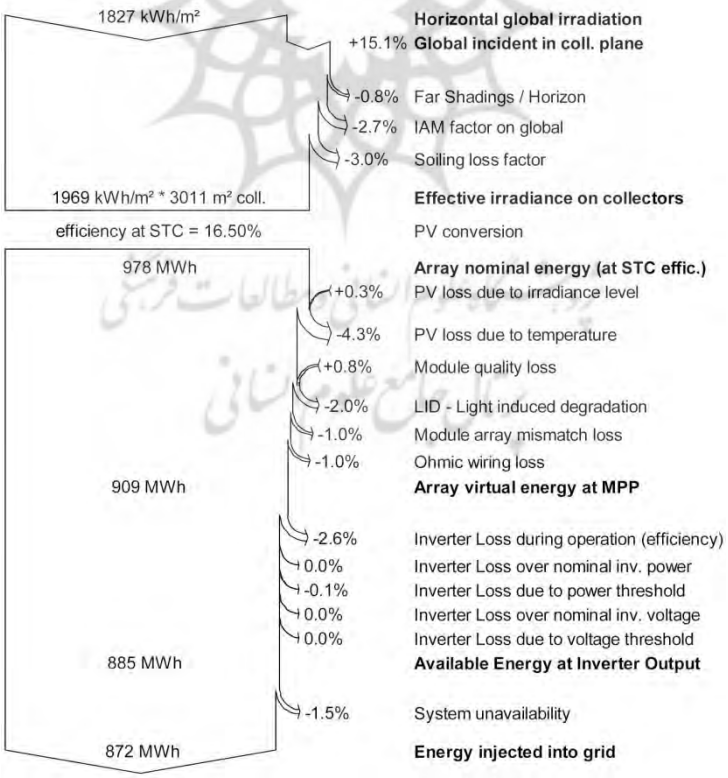
**Balances and main results**

| | GlobHor kWh/m² | T Amb °C | GlobInc kWh/m² | GlobEff kWh/m² | EArray MWh | E_Grid MWh | EffArrR % | EffSysR % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **January** | 81.0 | -0.05 | 126.5 | 118.8 | 59.17 | 57.54 | 15.53 | 15.10 |
| **February** | 97.3 | 2.21 | 133.8 | 125.6 | 61.55 | 59.90 | 15.28 | 14.87 |
| **March** | 141.1 | 6.88 | 171.1 | 160.2 | 76.92 | 74.90 | 14.93 | 14.54 |
| **April** | 173.2 | 13.04 | 184.7 | 172.6 | 80.31 | 78.23 | 14.44 | 14.06 |
| **May** | 208.5 | 18.16 | 202.0 | 188.5 | 85.81 | 83.34 | 14.10 | 13.70 |
| **June** | 223.6 | 23.67 | 208.1 | 194.1 | 85.91 | 70.45 | 13.71 | 11.25 |
| **July** | 222.7 | 26.06 | 211.4 | 197.4 | 86.59 | 84.17 | 13.60 | 13.22 |
| **August** | 209.3 | 26.20 | 216.0 | 202.3 | 88.12 | 85.77 | 13.55 | 13.19 |
| **September** | 173.4 | 21.64 | 204.2 | 191.9 | 85.25 | 83.16 | 13.86 | 13.53 |
| **October** | 131.1 | 15.48 | 177.1 | 166.7 | 76.62 | 74.64 | 14.37 | 13.99 |
| **November** | 91.4 | 7.24 | 141.5 | 132.7 | 64.08 | 62.49 | 15.04 | 14.67 |
| **December** | 74.3 | 2.66 | 126.6 | 118.4 | 58.52 | 56.96 | 15.35 | 14.94 |
| Year | 1826.9 | 13.66 | 2103.1 | 1969.2 | 908.84 | 871.55 | 14.35 | 13.76 |

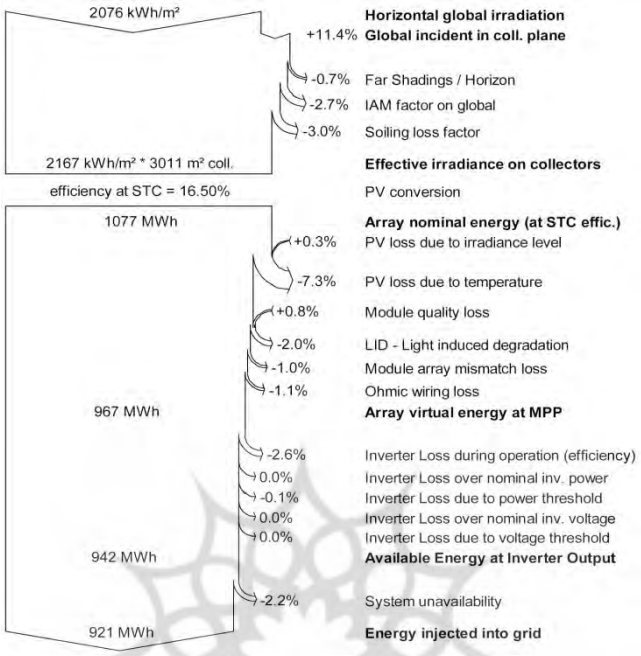
Legends:
GlobHor Horizontal global irradiation
T Amb Ambient Temperature
GlobInc Global incident in coll. plane
GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
EArray Effective energy at the output of the array
E_Grid Energy injected into grid
EffArrR Effic. Eout array / rough area
EffSysR Effic. Eout system / rough area

### ارزیابی پتانسیل خورشیدی برای منطقه های مختلف

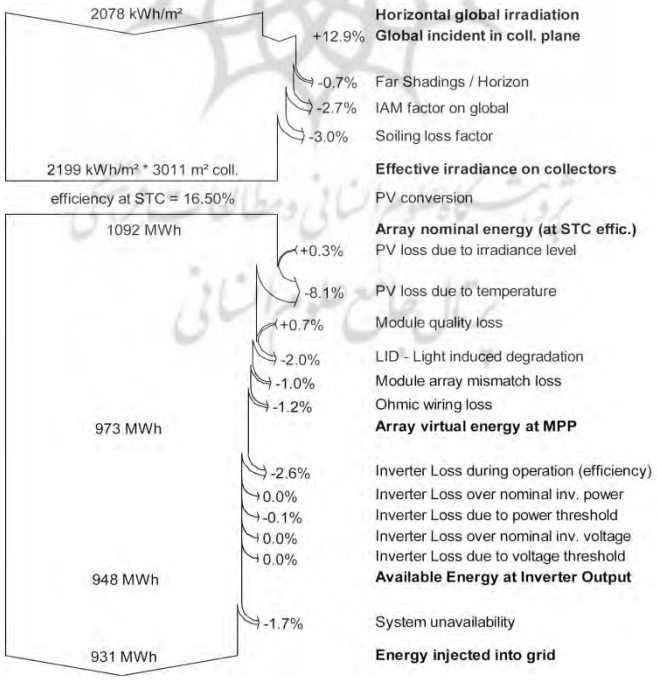
شکل‌های (۶) و (۷) و (۸) نتایج شبیه‌سازی و خروجی نرم‌افزار PVsyst را نشان می‌دهند که به ترتیب دیاگرام تلفات کل سیستم نصب‌شده در مناطق تهران، کرمان و یزد را ارائه می‌نمایند. مجموع شدت تابش افقی بر روی پنل‌های فتوولتاییک برای تهران، کرمان و یزد به ترتیب برابر ۱۸۲۷ ، ۲۰۷۶ و ۲۰۷۸ کیلووات ساعت بر مترمربع و تابش مؤثر برابر ۱۹۶۹ ، ۲۱۶۷ و ۲۱۹۹ کیلووات ساعت بر مترمربع می‌باشد. بنابراین میزان تلفات انرژی برای منطقه‌های تهران، کرمان و یزد تقریبا برابر ۶,۵ درصد بوده است. پس از آن، سلول فتوولتاییک انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. بعد از تبدیل انرژی توسط سلول، انرژی نامی آرایه‌ها به ترتیب برای تهران،کرمان و یزد برابر ۹۷۸ ، ۱۰۷۷ و ۱۰۹۹ مگاوات ساعت می‌باشد. بازدهی آرایه‌های فتوولتاییک برابر ۱۶,۵ درصد در شرایط استاندارد(STC) می‌باشد. انرژی مجازی بدست‌آمده از آرایه‌ها به ترتیب برای تهران، کرمان و یزد برابر ۹۰۹ ،۹۶۷ و ۹۷۳ مگاوات ساعت می‌باشد که پس از کسر تلفات اینورتر، میزان انرژی در دسترس در خروجی اینورتر به ترتیب برابر ۸۸۵ ،۹۴۲ و ۹۴۸ مگاوات ساعت خواهد شد و در نهایت، میزان انرژی تزریقی به شبکه نیز به ترتیب برابر با ۸۷۲ ، ۹۲۱ و ۹۳۱ مگاوات ساعت خواهد بود.




**شکل ٦) دیاگرام انرژی در تهران**




**شکل ۷) دیاگرام انرژی در کرمان**




**شکل ۸) دیاگرام انرژی در یزد**

## تحلیل اقتصادی و برآورد هزینه‌ها

هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سیستم‌های فتوولتاییک شامل هزینه ماژول‌های فتوولتاییک و هزینه‌های BoS[1] می‌باشد. هزینه ماژول فتوولتاییک با هزینه مواد خام بویژه هزینه‌های سیلیکون، پردازش، ساخت سلول و هزینه‌های مونتاژ آن مشخص می‌گردد. هزینه BOS شامل هزینه‌های ساخت (ازجمله نصب و راه‌اندازی سازه، آماده‌سازی مکان و سایر متعلقات) هزینه‌های سیستم‌های الکتریکی (شامل اینورتر، ترانسفورماتور، سیم‌کشی و دیگر هزینه‌های نصب و راه‌اندازی الکتریکی می‌باشد) و هزینه‌های باتری و یا سیستم‌های ذخیره‌سازی دیگر در صورت نیاز که برای موارد مستقل از شبکه کاربرد دارد. طبق برآوردهای اقتصادی انجام‌شده، متوسط هزینه احداث هر کیلووات نیروگاه خورشیدی در ایران با سیستم‌های معمولی در حدود نود میلیون ریال می‌باشد که با صرف‌نظر کردن از هزینه زمین موردنیاز برای احداث، کل سرمایه اولیه موردنیاز برای احداث نیروگاه ۵۰۰کیلوواتی برابر با ۴۵میلیارد ریال خواهد بود[۱۳].

جدول (۹) میزان انرژی تولیدی و تزریقی به شبکه، ضریب عملکرد، هزینه انرژی و درآمد سالانه حاصل از تزریق انرژی به شبکه سایت‌های مختلف را به‌صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد. با فرض اینکه مجموع سرمایه گذاری موردنیاز برای احداث یکسان و نرخ خرید انرژی الکتریکی توسط دولت برابر۴۴۳۰ریال باشد، زمان بازگشت سرمایه برای تهران ، یزد و کرمان به ترتیب برابر ۲۳/۲ ، ۲۲ و ۲۱/۸ سال محاسبه شده است. شایان ذکر است این محاسبات بدون در نظر گرفتن اعتبار سبز است که تحت پروتکل کیوتو تعریف شده و برای کاهش گازهای گلخانه‌ای تخصیص داده می‌شود و همچنین بدون در نظر گرفتن کمک‌های مالی دولت برای احداث نیروگاه‌های تجدید پذیر می‌باشد.

**جدول ۹) مقایسه مناطق**

| موضوع | تهران | کرمان | یزد |
|---|---|---|---|
| میزان انرژی تولیدی | ۸۷۱,۶ Mwh/year | ۹۲۱ Mwh/year | ۹۳۱,۲ Mwh/year |
| میزان انرژی تزریقی به شبکه | ۸۷۲ Mwh/year | ۹۲۱ Mwh/year | ۹۳۱ Mwh/year |
| ضریب عملکرد PR | ۰/۸۳۶ | ۰/۸۰۳ | ۰/۸۰۱ |
| درآمد سالانه (ریال) | ۳,۸۶۲,۹۶۰,۰۰۰ | ۴,۰۸۰,۰۳۰,۰۰۰ | ۴,۱۲۴,۳۳۰,۰۰۰ |
| زمان بازگشت سرمایه | ۲۳/۲ سال | ۲۲ سال | ۲۱/۸ سال |
| زمان بازگشت خالص(نقطه سربه‌سر شدن) | ۱۱/۶ سال | ۱۱ سال | ۱۰/۹ سال |

1) BALANCE of SYSTEM

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه کارآمد برای محیطزیست توسط نرم‌افزار PVsyst طراحی و شبیه‌سازی شد. با فرض یکسان بودن هزینه‌های احداث و تعمیر و نگهداری آن در تهران، کرمان و یزد یک نیروگاه فتوولتاییک ۵۰۰کیلوواتی شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفت. بیشترین شدت تابش خورشیدی در زاویه شیب آرایه ۳۰ درجه (برای یزد) به دست می‌آید که می‌توان گفت علت آن میزان شدت تابش این منطقه است. برای یک سیستم فتوولتاییک ۵۰۰ کیلوواتی متصل به شبکه، انرژی تولیدی در سایت یزد که برابر با ۹۳۱,۲ مگاوات ساعت بر سال می‌باشد، در مقایسه با دیگر مناطق مانند کرمان(۹۲۱مگاوات ساعت بر سال)، تهران(۸۷۱,۶کیلووات ساعت بر سال) بیشترین مقدار خواهد بود. برآورد اقتصادی نشان می‌دهد که احداث نیروگاه فتوولتاییک در یزد در مقایسه با سایر مناطق بهتر است.

## منابع


[۱] محمد حسین شمس، محسن کیا، بهداد مهدوی. (۱۳۹۲)، مطالعات طراحی بهینه یک نیروگاه فتوولتاییک ۱۰۰ کیلوواتی متصل به شبکه در تهران با استفاده از نرم‌افزار PVsyst، نشریه انرژی ایران، دوره۱۶، شماره۲، صفحه ۱۵-۳۰ .

[2] Afrouzi, H.N.; Mashak, S.V.; Dastgheib, A.M.; Tavalaei, J. 2011."Economic Sizing of Solar Array for a Photovoltaic Building in Malaysia with Matlab ", ICI.

[3] Afrouzi, H.N.; Mashak, S.V.; Mehranzamir, K; Salimi, B. 2011."Sizing grid-connected photovoltaic system using genetic algorithm", CIMSIM.

[4] DaveTurcotte, Michael Ross, Farah Sheriff. 2001. “Photovoltaic Hybrid System Sizing and Simulation Tools: Status and Needs”, PV Horizon: Workshop on Photovoltaic Hybrid Systems, Montreal.

[5] Hongbin Wu; Xiaofeng Tao. 2009. "Three phase photovoltaic grid-connected generation technology with MPPT function and voltage control", PEDS.

[6] Husnain-Al-Bustam, Md.Zakaria Mahbub, M. M. Shuvro Shahriar,T.M. Iftakhar Uddin& Md.Abrar Saad. 2012 “Analysis of a Standalone Photovoltaic Power Generation System Using PVSYST Software”, *Global Journals Inc.* (USA), Vol. 12.

[7] Mnassri M., A. St. Leger. 2010.” Stand Alone photovoltaic solar power generation system: A case study for a remote location in Tunisia”. power and energy society general meeting, IEEE,pages 1 – 4.

[8] Mohammad Ramadhan, Adel Naseeb. 2011. “The cost benefit analysis of implementing photovoltaic solar system in the state of Kuwait”, *Renewable Energy* 36, pp. 1272-1276.

[9] Phyo Naing. L. , D. Srinivasan. 2010. “estimation of solar power generating capacity” probabilistic methods applied to power systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th international conference on, pages 95 - 100.

[10] T.M. Iftakhar Uddin, Md. Abrar Saad, Husnain-Al- Bustam, Md. Zakaria Mahbub, 2012 “Computational Modeling of a GRID Connected System Using PVSYST Software”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 3.

[11] www.meteonorm.com

[12] www.pvsyst.com

[13] www.suna.org.ir/suna_content/media/image/2014/06/3127_orig.pdf

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی