



طراحی بهینه فنی نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک متصل به شبکه در کشور ایران (مطالعه موردی: شهر قزوین)

پدرام احدی^۱، فرید فخرآبادی^{۲*}، علیرضا پورشقاغی^۳، فرشاد کوشری^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
 - ۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
 - ۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
 - ۴- استاد، گروه مهندسی مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
- *قزوین، (Farbod.Fakhrabadi@iau.ac.ir)

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۵ تیر ۱۴۰۰

پذیرش: ۱ آبان ۱۴۰۰

ارائه در سایت: ۲۰ بهمن ۱۴۰۰

کلیدواژگان

انرژی تجدید پذیر
نیروگاه های خورشیدی فتوولتائیک
متصل به شبکه
طراحی فنی بهینه
PVsyst

چکیده

هدف از این پژوهش تعیین مقدار تجهیزات مورد استفاده در طراحی نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک با ظرفیت ۲۰۰ کیلو وات مورد نظر می باشد. در این تحقیق که توسط نرم افزار PVsyst انجام شد، پانل 500 w MonoTrina solar با تعداد ۴۰۰ عدد، اینورتر 25kw Growatt MID KTL3-X با تعداد ۸ عدد، که در ۴۰ ردیف و در هر ردیف ۱۰ پانل با هم دیگر سری می گردند، زاویه بهینه نصب پانل ۳۵° و زاویه بهینه آزیموت 0° تعیین شد (مطالعه موردی: شهر قزوین). با توجه به فضای در نظر گرفته شده و طراحی های انجام شده با احتساب درصد تلفات مجاز در محاسبات کابل، طول و سطح مقطع کابل سمت DC از جنس مس و آلومینیوم به ترتیب ۸۰۰ متر، ۱۶ و ۲۵ میلی متر مربع، طول و سطح مقطع کابل سمت AC جنس مس و آلومینیوم به ترتیب ۱۰۰ متر، ۱۶ و ۲۵ میلی متر مربع تعیین گردید. میزان انرژی تولیدی کل سالانه نقطه مورد نظر با در نظر گرفتن تلفات مشخص گردید که حدود ۳۳۷٫۱ مگاوات ساعت در سال بدست آمد.

Optimum Technical Design of a Grid-Connected Photovoltaic System Solar Power Plant in Iran (Case study: Qazvin city)

Pedram Ahadi¹, Farbod Fakhrabadi^{2*}, Alireza Pourshaghghi³, Farshad Kowsari⁴

- 1- PhD student, Department of Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
- 2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
- 3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
- 4- Professor, Department of Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

* Qazvin, (Farbod.Fakhrabadi@iau.ac.ir)

Article Information

Original Research Paper

Received 16 July 2021

Accepted 20 October 2021

Available Online 9 February 2022

Keywords

Renewable energy
grid-connected photovoltaic
solar power plants
optimal technical design
PVsyst

ABSTRACT

The purpose of this research is to determine the amount of equipment used in the design of the photovoltaic solar power plant with a capacity of 200 kW. In this research conducted by PVsyst software, 500 w MonoTrina solar panel with 400 pieces, 25kw Growatt MID KTL3-X inverter with 8 pieces, which are arranged in 40 rows and 10 panels in each row. The optimal panel installation angle was 35° and the optimal azimuth angle was 0° (case study: Qazvin city). According to the considered space and the designs made, including the percentage of permissible losses in cable calculations, the length and cross-sectional area of the DC side cable made of copper and aluminum are 800 meters, 16 and 25 mm square respectively, the length and cross-sectional area . AC side cable made of copper and aluminum is determined to be 100 meters, 16 and 25 mm square, respectively. The amount of total annual production energy of the desired point was determined by considering the losses, which was about 337.1 megawatt hours per year.

Please cite this article using:

Pedram Ahadi, Farbod Fakhrabadi, Alireza Pourshaghghi, Farshad Kowsari, Reza Samieifard, Optimum Technical Design of a Grid-Connected Photovoltaic System Solar Power Plant in Iran (Case study: Qazvin city), *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 12, No. 4, pp. 38-51, 2022 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

در سالیان اخیر مصرف انرژی در بسیاری از کشورها به دلایل متعددی از جمله صنعتی شدن، افزایش نرخ شهر نشینی و همچنین افزایش سریع جمعیت افزایش یافته است. در حال حاضر برای رشد و توسعه پایدار جوامع بشری، تأمین قسمتی از این انرژی مورد نیاز از محل انرژی های نو و تجدیدپذیر به عنوان راه حلی مطمئن و همسو با ملاحظات زیست محیطی مد نظر بسیاری از دولت ها، کارشناسان و دانشمندان در سراسر جهان قرار گرفته است. توسعه سریع و پایدار در هر کشوری نیازمند برقراری تعادلی پویا و پایا بین مقوله های فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی همزمان با در نظر گرفتن شرایطی است که سبب مخاطره یا کاهش فرصت های بعدی برای پیشرفت نگردد. یکی از راه حل هایی که امروزه برای حل مسئله تأمین انرژی در کنار در نظر گرفتن مخاطرات زیست محیطی بیش از پیش ارائه می گردد بهره برداری از منابع انرژی تجدید پذیر است. اصلی ترین و در عین حال در دسترس ترین منبع انرژی تجدید پذیر خورشید است که در صورت توان بهره برداری و تبدیل این انرژی بی پایان می توان بسیاری از مشکلات حوزه انرژی الکتریکی را رفع نمود. کشور ایران به عنوان یک کشور پهناور با میانگین تابش خورشید ۴/۵ کیلووات ساعت بر متر مربع، پتانسیل بسیار بالایی برای راه اندازی و بهره برداری از سیستم های خورشیدی و به طور خاص تولید انرژی الکتریکی از نیروگاه های خورشیدی را دارا است. تصمیم گیری برای راه اندازی یک نیروگاه خورشیدی به پارامترهای زیادی بستگی دارد که برای داشتن بازده مناسب باید آن ها را در نظر گرفت و همچنین به دقت مورد طراحی قرار گیرند. که این مهم با طراحی هر چه بهینه تر نیروگاه و داشتن بازدهی بالاتر قابل دست یابی است. طراحی بهینه نیروگاه از هر دو منظر اقتصادی و فنی بسیار حائز اهمیت است. با توجه به سیاست های حاکم در بخش سرمایه گذاری نیروگاه های تجدیدپذیر واضح است که بازدهی هرچه بالاتر نیروگاه که در نتیجه انتخاب تجهیزات مناسب و طراحی بهینه اتفاق می افتد باعث تولید بیشتر انرژی و در نتیجه درآمد بیشتر می گردد که باعث جذابیت هرچه بیشتر سرمایه گذاری در این نوع نیروگاه ها برای سرمایه گذاران خواهد گشت. در همین راستا پژوهش های بسیاری در داخل و خارج کشور در زمینه طراحی هر چه بهینه تر نیروگاه های خورشیدی صورت گرفته است. با توجه به افزایش روز افزون طراحی بهینه نیروگاه های خورشیدی یک روش برای طراحی بهینه و پیش

بینی تولید ارائه گردیده است [۲۰،۱]. در این رابطه تعدادی از پژوهشگران نیز در سالیان اخیر اقدام به شبیه سازی و مدل سازی عملکرد نیروگاه های فتوولتاییک نموده اند و در پاره ای از موارد نیز نتایج مدل سازی های خود را با نتایج آزمایشگاهی و اندازه گیری های میدانی مقایسه و تحلیل های فنی و اقتصادی را به انجام رسانده اند [۷-۳]. دی سوتو و همکاران در دانشگاه ویسکانسین مدل مشهور خود به نام پنج پارامتر را در خصوص مدل سازی پانل های خورشیدی ارائه کردند [۸]. یکی دیگر از تجهیزات مهم در شبیه سازی عملکرد، مبدل های جریان مستقیم به متناوب (اینورتر) می باشد، شبیه سازی عملکرد اینورترها نیز مورد توجه بسیاری قرار گرفته است و منحنی راندمان آنها در محاسبه توان خروجی از نیروگاه های فتوولتاییک توسط تعدادی از محققین بررسی شده است. دمولیاس و همکاران روش تحلیلی ساده ای برای محاسبه راندمان خروجی اینورترها برای انتخاب اندازه بهینه آنها در نیروگاه های فتوولتاییک خورشیدی ارائه نموده اند [۹]. داویلا-گومز و همکاران اقدام به ارائه مدلی دقیق برای شبیه سازی رفتار اینورترها در نیروگاه های فتوولتاییک متصل به شبکه نموده اند [۱۰]. سو و همکاران مدل سازی یک نیروگاه فتوولتاییک خورشیدی را جهت پیش بینی میزان توان تولیدی خروجی انجام دادند و نتایج شبیه سازی خود را با عملکرد واقعی یک نیروگاه واقعی با توجه به شرایط که در مدل سازی در نظر گرفته بودند مقایسه کردند. آن ها بازده کلی ماهانه را در ماه های مختلف بین ۱۰ تا ۱۲ درصد برای نیروگاه مذکور گزارش کردند [۱۱]. طراحان و نصب کنندگان سیستم به ابزاری قابل اعتماد برای پیش بینی عملکرد کلی سیستم، از جمله تولید کل انرژی در شرایط واقعی نیاز دارند [۱۲]. در سیستم SAPV، تقاضای انرژی باید تعیین شود تا از بزرگ شدن بیش از حد سیستم قدرت جلوگیری شود که می تواند منجر به هزینه اضافی شود [۱۳]. نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و افزایش قابل توجه قیمت سوخت های انرژی متعارف این فرصت را برای اکثر کشورها فراهم کرد تا سیاست های جدید انرژی را تنظیم کنند. این سیاست ها برای ارتقای منابع انرژی تجدیدپذیر در بخش برق طراحی شده اند [۱۴]. کاران کاپور و همکاران تکامل انرژی خورشیدی در هند بررسی کردند [۱۵]. کانولی و همکاران، همچنین ساناندا و همکاران به بررسی ابزارهای کامپیوتری برای تجزیه و تحلیل ادغام انرژی های تجدیدپذیر در سیستم های انرژی مختلف پرداختند [۱۶، ۱۷]. شارما و همکاران تجزیه و تحلیل عملکرد

یعنی سیستم های انرژی خورشیدی درون شبکه، خارج از شبکه و هیبریدی طبقه بندی می شوند. سیستم های انرژی خورشیدی آف گرید مجهز به سیستم ذخیره سازی انرژی هستند، بنابراین این قابلیت را دارد که حتی در زمانی که نور خورشید در دسترس نباشد، نیروی پشتیبان برای بار فراهم کند [۳۵]. شوکلا و همکاران تجزیه و تحلیل اکسرتیک ساختمان ماژول فتوولتائیک نیمه شفاف یکپارچه در شرایط آسمان صاف در بوپال هند را مورد بررسی قرار دادند [۳۶]. تلاش های تحقیقاتی زیادی بر روی فناوری های جدید ساختمان سبز مانند اجرای سیستم PV یکپارچه ساختمان (BIPV) در هند انجام شده است که در آن BIPV به محصولات PV اشاره دارد که استفاده می شوند [۳۸، ۳۷]. در ساختمان به عنوان جایگزینی برای مصالح ساختمانی معمولی [۳۹]. سیستم های BIPV در هند در مرحله توسعه هستند و به موارد بیشتری نیاز دارند سیستم های PV مختلف نصب شده در یونان، تایلند، ایرلند، اسپانیا، آفریقای جنوبی در هند را مقایسه می کند و به این نتیجه می رسد که یک نیروگاه PV روی پشت بام می تواند راه حل خوبی باشد [۴۰]. مقالات زیادی برای طراحی یک سیستم با استفاده از نرم افزار PVsyst و اهمیت پیش اندازه گیری گزارش شده است [۴۱]. سیستم های فتوولتائیک (PV) به سرعت در حال توسعه هستند. آنها به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر، با ارائه یک محیط امن، نقش مهمی را در جهان ایفا می کنند. معایب نیروگاه های خورشیدی متناوب بودن منبع، هزینه بالای نصب و عملکرد تبدیل انرژی نسبتاً پایین می باشند [۴۲]. کوسکسو و همکاران پتانسیل انرژی های تجدیدپذیر و جهت گیری های سیاست ملی برای توسعه پایدار در مراکش را بررسی کردند. مراکش تنها کشور آفریقایی است که برق تولید شده از منابع انرژی تجدیدپذیر را با اروپا مبادله می کند. موقعیت استراتژیک مراکش از جایگاه مهمی برخوردار است [۴۳-۴۵]. سیستم فتوولتائیک شامل صفحات خورشیدی، اینورترها، واحد تهویه برق و تجهیزات متصل به شبکه است [۴۶]. اوتریلاس و همکاران مطالعاتی در شهر تتوان را انجام دادند که داده های اندازه گیری شده مانند تابش ماهانه خورشیدی جهانی (Gh)، انتشار ماهانه (Gd)، دمای متوسط (Taverage) و سرعت باد (Ws) و پارامترهای قبلی که توسط آزمایشگاه انرژی دانشکده ارائه شده است را به عنوان داده های ورودی در نظر گرفتند [۴۷]. بارا و همکاران مدلی برای نیروگاه خورشیدی با در نظر گرفتن اثر سایه پیشنهاد کردند [۴۸]. در یک مطالعه

نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی تعاملی شبکه ۱۹۰ کیلووات بر ثانیه در هند را بررسی کردند [۱۸]. داده های تولید طراحی بهینه سیستم فتوولتائیک مستقل توسط شیوا کومار و همکاران توسعه داده شد [۱۹]. ایروان و همکاران سیستم فتوولتائیک مستقل با استفاده از نرم افزار PVSyst ارزیابی کردند [۲۰]. عوامل خاصی مانند شرایط جغرافیایی و آب و هوا، تابش خورشیدی و مصرف بار وجود دارد که در استفاده از انرژی خورشیدی مهم می باشند [۲۱]. هیسن و همکاران، علی و همکاران و شارما و همکاران بررسی کردند که سیستم PV نقش مهمی در کاهش گرمایش جهانی و دستیابی به اهداف تغییر اقلیم ایفا می کند [۲۲-۲۴]. به غیر از انرژی الکتریکی، انرژی خورشیدی کاربردهای بسیار دیگری نیز دارد، از جمله می توان از آن برای گرم کردن آب، گرمایش اتاق، پمپ خورشیدی، خشک کن و غیره استفاده کرد این هدف را می توان با استفاده از باتری ها یا با اتصال سیستم قدرت به یک شبکه به دست آورد [۲۵]. بلاجی و همکاران طراحی، تجزیه و تحلیل و بررسی اقتصادی سیستم PV خورشیدی سقفی مستقل برای روستایی در هند را مورد بررسی قرار دادند [۲۶]. استفاده از سیستم های فتوولتائیک برای تولید برق در زمان های اخیر بسیار برجسته شده است. این افزایش عمدتاً به دلیل کمبود سایر منابع انرژی مانند سوخت های فسیلی است. بنابراین نیاز به منابع قابل اعتماد و پایدار مانند سیستم های فتوولتائیک می باشد که انرژی پایان ناپذیر نور خورشید را می گیرد و آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند [۲۷-۲۹]. جان و همکاران، نفاوی و همکاران استخراج حداکثر انرژی از صفحات خورشیدی را در کشور هند مورد بررسی قرار دادند [۳۱، ۳۰]. راندمان کلی یک سیستم PV تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله جنس سلول فتوولتائیک، روش نصب، شیب یا جهت گیری سیستم، آرایش سلول های PV در سیستم، شرایط آب و هوایی محل و غیره است [۳۲]. مصرف برق روز به روز در حال افزایش است. از سوی دیگر، منابع انرژی متعارف مانند زغال سنگ و نفت معدنی مانند بنزین، گازوئیل و غیره به سرعت در حال کاهش هستند. برای پاسخگویی به تقاضای فزاینده برای برق، یافتن راهی جایگزین برای تولید برق ضروری است [۳۳]. انتشار CO₂ در انرژی های سبز بسیار کم یا نادیده گرفته شده است [۳۴]. انرژی های تجدیدپذیر به عنوان مثال سیستم های PV به طور رایج برای تولید برق برای پاسخگویی به تقاضای فزاینده برای برق استفاده می شوند. سیستم های PV بر اساس سه توپولوژی

در صورت تعیین بهینه پارامترهای تجهیزات و طراحی نیروگاه به طور هم زمان می توان به نقطه کار بهینه برای این ۴ مورد دست یافت. موارد مورد توجه جهت بهینه سازی در بخش طراحی و تجهیزات به شرح زیر هستند:

- ۱- زاویه نصب پنل
- ۲- زاویه آزیموت
- ۳- توان پنل مورد استفاده
- ۴- توان، تعداد MPPT، جریان خروجی و سط ولتاژ اینورتر
- ۵- تعداد استرینگ ها
- ۶- تعداد آرایه ها
- ۷- طول و سطح مقطع کابل های DC
- ۸- طول و سطح مقطع کابل های AC

۳- طراحی بهینه سیستم خورشیدی فتوولتائیک متصل به شبکه با ظرفیت ۲۰۰ کیلووات

با توجه به اینکه مبنای طراحی را بر اساس مقیاس و ظرفیت نیروگاه ۲۵ کیلو وات در نظر گرفته ایم ولی در اصل هدف همان احداث نیروگاه ۲۰۰ کیلو وات می باشد، که با در نظر گرفتن ۸ عدد نیروگاه ۲۵ کیلو وات می توان به توان نیروگاه ۲۰۰ کیلو وات رسید. دلیل این کار این است که اگر اینورتر یا پانلی از نیروگاه خراب شود قسمتی از نیروگاه بتواند به تولید انرژی خود ادامه دهد، در فضای نمونه در نظر گرفته شده فاصله پانل ها تا اینورترها مجموعاً ۵۰ متر سمت DC و از اینورتر تا کنتور مجموعاً ۱۰۰ متر سمت AC در نظر گرفته می شود. یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه نشان داده شده در شکل ۱ در این بخش توضیح داده شده است. عناصر اصلی که برای پیکربندی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه شامل ماژول های PV، اینورترها، جعبه فیوز، کنتور برق و خطوط شبکه هستند. ماژول های PV برق DC را تولید می کنند که حاصل جریان و ولتاژ است. اینورتر ولتاژهای DC را به ولتاژ AC تبدیل می کند. خروجی AC اینورتر با کمک کنتور برق و به دنبال جعبه فیوز به شبکه عرضه می شود. در سیستم های PV متصل به شبکه، اینورتر همیشه سعی می کند در فاز با شبکه کار کند. اینورتر به طور مداوم یک خروجی سینوسی تولید می کند. اتصال به شبکه را می توان از پایانه های خروجی یک اینورتر با اتصال قطع کننده مدار در جعبه فیوز و کنتور برق انجام داد [۵۷].

تطبیقی ماندل و همکاران مقایسه ای بین عملکرد بلند مدت اندازه گیری شده و پیش بینی شده یک سیستم برق PV متصل به شبکه در ایرلند شمالی با استفاده از نرم افزار TRNSYS انجام داده اند [۴۹]. کوسادا و همکاران مطالعه ای برای مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی برای یک نیروگاه PV سیلیکونی تک کریستالی در اسپانیا انجام دادند [۵۰]. خطیب و همکاران مروری بر بهینه سازی اندازه سیستم های PV انجام دادند که نشان می دهد بیشتر مقالات تحقیقاتی در این موضوع با سیستم های PV مستقل سروکار دارند [۵۱]. سلیمان و همکاران به انتخاب ماژول و اینورتر و بهینه سازی تعداد ماژول های متصل به صورت سری و موازی در یک سیستم GCPV پشت بام پرداختند [۵۲]. ناتون و همکاران بهینه سازی نسبت اندازه اینورتر را با به حداکثر رساندن بازده کل ماژول ها و اینورتر ارائه کردند [۵۳]. چن و همکاران بهینه سازی دقیق تری از اندازه اینورتر با تابع هدف از صرفه جویی در هزینه کل در مقایسه با حالت پایه ارائه کردند، که در آن توان اسمی کل اینورترها و ماژول های PV برابر است [۵۴]. آرنسکو و همکاران میدان خورشیدی گیاهان GCPV را با متغیرهای تصمیم گیری زاویه شیب، فاصله بین ردیف ها، ارتفاع و تعداد ردیف ها، تعداد ماژول های متصل به صورت سری و موازی و طول و عرض بهینه کردند [۵۵]. ووکونی و همکاران بر بهینه سازی زاویه شیب ماژول های PV متمرکز شدند و اهمیت در نظر گرفتن همه عوامل مرتبط را از جمله سایه، گرد و غبار، باد و هزینه ساخت در طول بهینه سازی برجسته ساختند [۵۶]. در این پژوهش هدف طراحی بهینه نیروگاه و مطالعه خروجی های آن توسط نرم افزار PVSyst می باشد. هدف ماکزیمم کردن انرژی خروجی سالیانه نیروگاه (MWh) می باشد. همچنین پارامترهای طراحی و تجهیزات طوری به صورت بهینه طراحی می گردند که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه گردد.

۲- طراحی بهینه و مدل سازی فنی نیروگاه خورشیدی

در این بخش که بسیار حائز اهمیت و تعیین کننده است به موضوع طراحی و تعیین تجهیزات می پردازیم. مطالعات این بخش بر موارد زیر تاثیر مستقیم دارند:

- ۱- میزان تلفات
- ۲- بازدهی نیروگاه
- ۳- هزینه تمام شده نیروگاه
- ۴- درآمد نیروگاه و دوره بازگشت سرمایه

بیش از اندازه باشد. نرم افزار PVSyst دارای مجموعه بزرگی از داده های هواشناسی برای سراسر جهان است که در صورت عدم دسترسی به پایگاه داده، امکان درج دستی داده ها را نیز فراهم می کند. برای به دست آوردن اندازه و طراحی مناسب با ارزیابی فنی و اقتصادی سیستم PV، باید تمام ورودی های مورد نیاز نرم افزار را فراهم کنیم، به عنوان مثال: مکان، زاویه شیب، زاویه آزیموت، ماژول PV و مشخصات اینورتر، سایه زنی و غیره. پارامترهای خروجی شبیه سازی نرم افزار PVSyst شامل داده های هواشناسی، کارایی و تلفات مختلف، نسبت عملکرد، تولید انرژی، تعادل انتشار کربن، ارزیابی مالی و غیره می باشند.

۳-۲- انتخاب پانل فتوولتائیک

حال بر اساس پانل و اینورتر انتخاب شده، در مقیاس نیروگاه ۲۵ کیلووات متصل به شبکه طراحی بهینه و فنی و شبیه سازی نیروگاه را انجام خواهیم داد. انرژی خورشیدی به صورت تابش ارائه می شود. اندازه آرایه های PV به تابش خورشیدی موجود بستگی دارد. تعداد زیادی ماژول خورشیدی برای ساخت آرایه ها متصل شده است [۶۱].

فرمول محاسبه تعداد پانل مورد استفاده در نیروگاه به صورت رابطه (۱) می باشد:

$$\text{توان نیروگاه} = \frac{\text{توان پانل}}{\text{توان پانل}} \quad (۱)$$

۳-۳- طراحی و انتخاب اینورتر

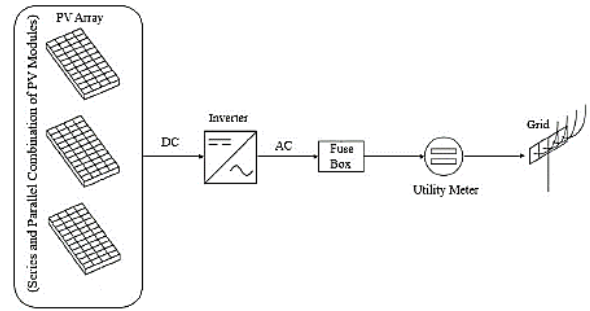
اینورتر برای حداکثر توان برای سیستم طراحی و انتخاب شده است. مبدل MPPT که حالت DC را به حالت AC تبدیل می کند، همیشه با حداکثر کارایی خود کار نمی کند. حداکثر بازدهی که می توان تولید کرد ۹۶ درصد خروجی آنها از این مبدل MPPT است [۶۲]. در این قسمت اینورتری را انتخاب می کنیم که توان آن با توان نیروگاه برابری کند. توان اینورتر را به صورت رابطه (۲) بدست می آوریم:

$$\text{توان نیروگاه} = \text{توان اینورتر} \quad (۲)$$

۳-۴- طراحی تعداد استرینگ و آرایه ها

محاسبه تعداد حداکثر و حداقل پنل مجاز که سری بسته می شوند N_{min} و N_{max} به صورت روابط زیر می باشند، تعداد ماکزیمم پانل هایی که در کنار هم می توانیم در یک ردیف از نیروگاه سری کنیم:

$$N_{max} < \frac{V_{max\ DC\ inverter}}{V_{oc\ @\ coldest}} \quad (۳)$$



شکل ۱ چیدمان سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

۳-۱- روش شبیه سازی با نرم افزار PVSyst

مدل شبیه سازی یک سیستم فتوولتائیک Si-poly متصل به شبکه برنامه ریزی شده از نظر فنی مطابق با مشخصات پروژه اندازه گیری شده و با استفاده از ابزار نرم افزار PVSyst شبیه سازی شده است. این مدل شبیه سازی شده از ماژول های PV، اینورترها و شبکه واسط شبکه تشکیل شده است [۵۸]. PVSyst یک نرم افزار شبیه سازی است که ابتدا در ژنو طراحی شد و به محاسبه کار و عملیات سیستم PV کمک می کند. این نرم افزار به طراحی پیکربندی سیستم کمک می کند و همچنین امکان محاسبه میزان انرژی تولید شده را فراهم می کند. خروجی مبتنی بر شبیه سازی سیستم اندازه گیری است که بیشتر به موقعیت جغرافیایی سایت سیستم PV بستگی دارد. نتایج ممکن است شامل چندین متغیر شبیه سازی باشد که می توانند در مقادیر ماهانه، روزانه یا ساعتی نمایش داده شوند. "نمودار تلفات" نقاط ضعف در طراحی سیستم را پیش بینی می کند [۵۹]. شارما و همکاران در نرم افزار PVSyst نتایج خوبی را برای اندازه گیری اولیه اینورتر و پانل PV ارائه داده اند [۶۰]. یک روش مناسب برای انجام شبیه سازی با استفاده از نرم افزار PVSyst با استفاده از اطلاعات مربوط به تابش یا تابش خورشیدی، دمای محیط، سرعت باد و پارامترهای فیزیکی پانل های PV مورد نیاز است. وزارت انرژی های نو و تجدیدپذیر (MNRE) قبلاً یک سیستم پایش آب و هوا را راه اندازی کرده است که در آن تمام داده های فیزیکی در زمان واقعی در دسترس هستند. اطلاعات طول و عرض جغرافیایی نیز یک پارامتر کلیدی برای تعیین اندازه گیری تابش خورشیدی است. اطلاعات هواشناسی موجود از سازمان ملی هوانوردی و فضایی (ناسا) برای جزئیات داده های لازم برای PVSyst قابل دسترسی است. نرم افزار PVSyst یک ابزار طراحی و شبیه سازی سیستم PV است که اندازه گیری اولیه اینورتر و پانل های PV را فراهم می کند به طوری که اینورتر و پنل PV انتخابی نباید کمتر یا

که در آن مقادیر I_n جریان مصرف در سمت DC همان جریان اتصال کوتاه در پانل ها، F ضریب تصحیح حرارتی، K ضریب مجاورت می باشند (جدول ۱).

جدول ۱ تعداد رشته کابل با توجه به ضریب مجاورت K

ضریب K	تعداد کابل در کانال
۱	۱
۰,۸۲	۲
۰,۷۵	۳
۰,۶۸	۴
۰,۶۴	۵
۰,۶	۶
۰,۵۸	۷
۰,۵۶	۸
۰,۵۴	۹
۰,۵۳	۱۰

ضریب تصحیح حرارتی :

$$F = \sqrt{\frac{(70-T)}{50}} \quad (7) \quad \text{برای کابل کشی زمینی}$$

که T دمای محیط برابر 25°C می باشد.

$$F = \sqrt{\frac{(70-T)}{40}} \quad (8) \quad \text{برای کابل کشی هوایی}$$

برای سمت AC در حالت تک فاز :

$$I = \frac{P}{V \cos\phi} \quad (9)$$

که P توان اینورتر (W) و ولتاژ در حالت تک فاز $230V$ و مقدار $\cos\phi$ برابر $0,9$ می باشند.

برای سمت AC در حالت سه فاز :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} V \cos\phi} \quad (10)$$

که در آن P توان اینورتر (W)، V ولتاژ در حالت سه فاز $400V$ و مقدار $\cos\phi$ برابر $0,9$ می باشند.

۲. محاسبه سطح مقطع هادی

در این قسمت ۲ روش موجود است، یکی از روش ها توسط فرمول زیر محاسبه می گردد که به صورت زیر است:

$$S = \frac{0.04 \times L \times I}{\frac{V}{20}} \quad (11)$$

که V_{oc} و V_{max} به ترتیب ماکزیمم ولتاژ اینورتر و ولتاژ مدار باز پانل می باشند که در داخل دیتا شیت اینورتر و پانل این مقادیر موجود می باشند. $V_{oc} @ coldest$ ولتاژ مدار باز پانل در سردترین دما که برای محاسبه آن ولتاژ مورد نظر در یک ضریب 20% ضرب خواهد گردید. تعداد مینیمم پانل هایی که در کنار هم می توانیم در یک ردیف از نیروگاه سری کنیم به صورت:

$$N_{min} > \frac{V_{min DC inverter}}{V_{mp}} \quad (4)$$

که V_{mp} و V_{min} به ترتیب مینیمم ولتاژ اینورتر و ولتاژ پانل می باشند که در داخل دیتا شیت اینورتر و پانل این مقادیر موجود می باشند. پس در نتیجه رنج تعداد پانل ها باید در بازه ی زیر قرار گیرند:

$$N_{min} < N_{max} < \text{تعداد پانل ها} \quad (5)$$

با توجه به رنج ولتاژی اینورتر V_{max} و V_{min} ، V_{mp} پانل که در دیتا شیت های مربوطه موجود می باشند، همچنین مقادیر N_{min} و N_{max} تعداد حداکثر و حداقل پانل مجاز که سری بسته می شوند، می توان تعداد استرینگ (رشته) را بدست آورد.

با توجه به تعداد MPPT، تعداد درگاه ورودی اینورتر و جریان اتصال کوتاه پانل I_{sc} که هر کدام در دیتا شیت اینورتر یا پانل موجود است، می توان تعداد آرایه (ردیف) در نیروگاه را محاسبه نمود. بازده آرایه به عنوان نسبت انرژی سمت DC تولید شده از آرایه فتوولتائیک به توان اسمی آرایه فتوولتائیک تعریف می شود [۶۳-۶۶].

۳-۵- انتخاب و طراحی سیم و کابل

یک فضای نمونه برای نیروگاه در نظر خواهیم گرفت، و با توجه به آن فاصله پانل ها تا اینورتر را سمت DC و فاصله ی اینورتر تا کنتور را سمت AC نیروگاه در نظر خواهیم گرفت. در نیروگاه های متصل به شبکه نیروگاه در مقیاس $5KW$ معمولاً تک فاز می باشند، اگر در داخل آپارتمان ها از آسانسور استفاده گردد شامل 3 فاز خواهد شد. نیروگاه های $5KW$ به بالا همگی 3 فاز هستند. برای محاسبات کابل سمت DC و AC مراحل زیر را با توجه به روابط موجود در نظر خواهیم گرفت:

۱. حداکثر جریان عبور از هادی

برای سمت DC :

$$I_c = \frac{I_n}{K.F} \quad (6)$$

لومنوم	۱۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰
۱.۵	۲.۵	۳.۷	۵.۰	۶.۳	۷.۶	۸.۹	۱۰.۲	۱۱.۵	۱۲.۸	۱۴.۱	۱۵.۴	۱۶.۷	۱۸.۰	۱۹.۳	۲۰.۶	۲۱.۹	۲۳.۲
۲.۵	۴.۰	۶.۰	۸.۰	۱۰.۰	۱۲.۰	۱۴.۰	۱۶.۰	۱۸.۰	۲۰.۰	۲۲.۰	۲۴.۰	۲۶.۰	۲۸.۰	۳۰.۰	۳۲.۰	۳۴.۰	۳۶.۰
۴.۰	۶.۰	۹.۰	۱۲.۰	۱۵.۰	۱۸.۰	۲۱.۰	۲۴.۰	۲۷.۰	۳۰.۰	۳۳.۰	۳۶.۰	۳۹.۰	۴۲.۰	۴۵.۰	۴۸.۰	۵۱.۰	۵۴.۰
۶.۰	۹.۰	۱۳.۵	۱۸.۰	۲۲.۵	۲۷.۰	۳۱.۵	۳۶.۰	۴۰.۵	۴۵.۰	۴۹.۵	۵۴.۰	۵۸.۵	۶۳.۰	۶۷.۵	۷۲.۰	۷۶.۵	۸۱.۰
۱۰.۰	۱۵.۰	۲۲.۵	۳۰.۰	۳۷.۵	۴۵.۰	۵۲.۵	۶۰.۰	۶۷.۵	۷۵.۰	۸۲.۵	۹۰.۰	۹۷.۵	۱۰۵.۰	۱۱۲.۵	۱۲۰.۰	۱۲۷.۵	۱۳۵.۰
۱۶.۰	۲۴.۰	۳۶.۰	۴۸.۰	۶۰.۰	۷۲.۰	۸۴.۰	۹۶.۰	۱۰۸.۰	۱۲۰.۰	۱۳۲.۰	۱۴۴.۰	۱۵۶.۰	۱۶۸.۰	۱۸۰.۰	۱۹۲.۰	۲۰۴.۰	۲۱۶.۰
۲۵.۰	۳۷.۵	۵۶.۲۵	۷۵.۰	۹۳.۷۵	۱۱۲.۵	۱۳۱.۲۵	۱۵۰.۰	۱۶۸.۷۵	۱۸۷.۵	۲۰۶.۲۵	۲۲۵.۰	۲۴۳.۷۵	۲۶۲.۵	۲۸۱.۲۵	۳۰۰.۰	۳۱۸.۷۵	۳۳۷.۵
۳۵.۰	۵۲.۵	۷۸.۷۵	۱۰۴.۲۵	۱۲۹.۷۵	۱۵۵.۲۵	۱۸۰.۷۵	۲۰۶.۲۵	۲۳۱.۷۵	۲۵۷.۲۵	۲۸۲.۷۵	۳۰۸.۲۵	۳۳۳.۷۵	۳۵۹.۲۵	۳۸۴.۷۵	۴۱۰.۲۵	۴۳۵.۷۵	۴۶۱.۲۵
۵۰.۰	۷۵.۰	۱۱۲.۵	۱۵۰.۰	۱۸۷.۵	۲۲۵.۰	۲۶۲.۵	۳۰۰.۰	۳۳۷.۵	۳۷۵.۰	۴۱۲.۵	۴۵۰.۰	۴۸۷.۵	۵۲۵.۰	۵۶۲.۵	۶۰۰.۰	۶۳۷.۵	۶۷۵.۰
۷۰.۰	۱۰۴.۲۵	۱۵۵.۲۵	۲۰۶.۲۵	۲۵۷.۲۵	۳۰۸.۲۵	۳۵۹.۲۵	۴۱۰.۲۵	۴۶۱.۲۵	۵۱۲.۲۵	۵۶۳.۲۵	۶۱۴.۲۵	۶۶۵.۲۵	۷۱۶.۲۵	۷۶۷.۲۵	۸۱۸.۲۵	۸۶۹.۲۵	۹۲۰.۲۵
۱۰۰.۰	۱۵۵.۲۵	۲۲۵.۰	۳۰۰.۰	۳۷۵.۰	۴۵۰.۰	۵۲۵.۰	۶۰۰.۰	۶۷۵.۰	۷۵۰.۰	۸۲۵.۰	۹۰۰.۰	۹۷۵.۰	۱۰۵۰.۰	۱۱۲۵.۰	۱۲۰۰.۰	۱۲۷۵.۰	۱۳۵۰.۰
۱۶۰.۰	۲۴۳.۷۵	۳۵۹.۲۵	۴۸۷.۵	۶۱۴.۲۵	۷۴۱.۷۵	۸۶۹.۲۵	۹۹۶.۷۵	۱۱۲۴.۲۵	۱۲۵۱.۷۵	۱۳۷۹.۲۵	۱۵۰۶.۷۵	۱۶۳۴.۲۵	۱۷۶۱.۷۵	۱۸۸۹.۲۵	۲۰۱۶.۷۵	۲۱۴۴.۲۵	۲۲۷۱.۷۵
۲۵۰.۰	۳۷۵.۰	۵۲۵.۰	۷۱۶.۲۵	۹۰۷.۵	۱۱۰۰.۰	۱۲۹۱.۲۵	۱۴۸۲.۵	۱۶۷۳.۷۵	۱۸۶۵.۰	۲۰۵۶.۲۵	۲۲۴۷.۵	۲۴۳۸.۷۵	۲۶۳۰.۰	۲۸۲۱.۲۵	۳۰۱۲.۵	۳۲۰۳.۷۵	۳۳۹۵.۰
۳۵۰.۰	۵۲۵.۰	۷۱۶.۲۵	۹۰۷.۵	۱۱۰۰.۰	۱۳۹۱.۲۵	۱۵۸۲.۵	۱۷۷۳.۷۵	۱۹۶۵.۰	۲۱۵۶.۲۵	۲۳۴۷.۵	۲۵۳۸.۷۵	۲۷۳۰.۰	۲۹۲۱.۲۵	۳۱۱۲.۵	۳۳۰۳.۷۵	۳۴۹۵.۰	۳۶۸۶.۲۵

۳-۶- استراکچر پانل های فتوولتائیک

با توجه به وزن هر پانل برای پشتیبانی از این پانل های PV سنگین با زاویه کج خاص و محافظت در برابر باد و طوفان شدید، سازه های آهنی سخت و سنگین استراکچر مورد نیاز است. این سازه های آهنی باید گالوانیزه شوند تا در معرض نور خورشید، گرما و باران آسیب نبینند. از این رو، باید قانون IP67 را تأیید کند، که محافظت در برابر گرد و غبار و محافظت در برابر اثرات غوطه ور شدن موقت در آب تا عمق ۳ فوت تا ۳۰ دقیقه را ارائه می دهد [۶۸].

۳-۷- انتخاب ارتینگ و اجزاء حفاظتی

برای جلوگیری از تلفات در هنگام اتصال کوتاه و صاعقه به زمین و حفاظت نیاز است. اتصال زمین برای از بین بردن جریان اضافی تولید شده در اتصال کوتاه ارائه می شود. ائتلاف جریان به مقاومت خاک بستگی دارد. اگر مقاومت خاک زیاد باشد، خاک نمی تواند جریان زیادی را جذب نماید. بنابراین برای بهبود مقاومت خاک از روش های مختلفی استفاده می شود. اما معایب خاصی از جمله نمک و زغال چوب به خاک می رسد، بنابراین نیاز به نگهداری منظم دارد. از ارت شیمیایی برای جلوگیری از تعمیر و نگهداری منظم استفاده می شود. ارتینگ شیمیایی از اجزای مبتنی بر بنتونیت یا گرافیت همراه با الکتروود مس استفاده می کند که به کاهش مقاومت خاک کمک می کند [۶۹]. صاعقه گیرها یا برق گیرها را نیز می توان در سیستم قرار داد، اما SPD ها به عنوان برقگیرهای سریع الاثر در نظر گرفته می شوند [۷۰، ۷۱]. فیوزهای با ظرفیت پارگی بالا (HRC) از اجزای سرامیکی ساخته شده اند که در اینجا استفاده می شود [۷۲]. فیوزهای HRC بادوام هستند و می توانند جریان بالاتری را در شرایط خطا قطع کنند [۷۳].

۳-۸- جعبه اتصال آرایه

جعبه های اتصال آرایه ای برای اتصال ماژول های PV به صورت سری و موازی استفاده می شوند. جعبه ها از مواد ساخته

که در آن S سطح مقطع کابل بر حسب میلی متر مربع، L طول کابل بر حسب متر، اشدت جریان جاری در کابل بر حسب آمپر، V ولتاژی که سیستم بر اساس آن طراحی شده است. این روش، روش خوبی نیست، بهترین و مرسوم ترین روش استفاده از جدول می باشد (جدول ۲). در این روش ابتدا جریانی که در مرحله اول بدست آمد I_c و بر اساس مقدار مترائ یا مسافت می توان به نمره ی کابل دست پیدا کرد.

۳. افت ولتاژ هادی

در حالت DC و تک فاز:

$$\Delta u\% = \frac{2 \times L \times P}{u^2 \times S} \times 1.786 \quad (12)$$

که در آن $\Delta u\%$ افت ولتاژ هادی، L طول کابل مورد نیاز بر حسب متر، S سطح مقطع کابل می باشند. توجه: P در سمت DC توان یک ردیف پنل و در سمت AC توان اینورتر (توان نیروگاه) می باشند. توجه: u در سمت DC،

$$u = V_{mp} \text{ پانل} \times \text{تعداد پانل یک ردیف} \quad (13)$$

u در سمت AC، در حالت تک فاز برابر 230v، در حالت سه فاز برابر 400v می باشند. در حالت سه فاز، هادی از جنس مس:

$$\Delta u\% = \frac{L \times P}{u^2 \times S} \times 1.786 \quad (14)$$

در حالت سه فاز، هادی از جنس آلومینیوم:

$$\Delta u\% = \frac{L \times P}{u^2 \times S} \times 2.857 \quad (15)$$

توجه: حداکثر ولتاژ هادی باید کمتر از ۲٪ باشد یعنی ($\Delta u\% < 2\%$)

توجه: حداقل نمره کابلی که باید در سیستم های خورشیدی استفاده کنیم کابل نمره 4 mm^2 می باشد.

جدول ۲ محاسبه سطح مقطع سیم های مسی و آلومینیومی، نسبت به مسافت و جریان مجاز

تا کنتور مجموعاً ۱۰۰ متر سمت AC در نظر گرفته می شود. نتایج محاسبات و طراحی کابل به صورت جدول (۵) می باشد.

جدول ۵ طول و سطح کابل مورد استفاده

جنس	افت ولتاژ هادی	سطح مقطع (میلی متر مربع)	طول (متر)	سمت کابل
جنس مس	۰,۳۶۵۶۱۵۹۹۳	۱۶	۸۰۰	DC
جنس آلومینیوم	۰,۵۸۴۸۶۲۷۶۱	۲۵	۸۰۰	DC
جنس مس	۱,۷۴۴۱۴۰۶۲۵	۱۶	۱۰۰	AC
جنس آلومینیوم	۲,۷۹۰۰۳۹۰۶۳	۲۵	۱۰۰	AC

۲-۴- نتایج شبیه سازی سیستم ۲۰۰ کیلووات خورشیدی فتوولتائیک متصل به شبکه توسط نرم افزار

PVsyst

۴-۲-۱- مشخص کردن موقعیت جغرافیایی

در این قسمت مکان جغرافیایی را برای نصب سیستم PV که باید تجزیه و تحلیل بر روی آن انجام شود انتخاب می کنیم. این نرم افزار گزینه هایی را برای انتخاب بین سایت های موجود یا سایت های جدید ارائه می دهد. PVsyst می تواند هر مکان روی زمین را شناسایی و تجزیه و تحلیل کند. مکان انتخاب شده باید با هر منبع داده ماهواره ای که توسط نرم افزار ارائه می شود مرتبط شود (به عنوان مثال، داده های ماهواره ای NASA-SSE). پارامترهای موثر بر مکان انتخاب شده به صورت جدولی نمایش داده می شوند یا در برخی موارد به صورت فایل ذخیره می شوند. به عنوان مثال شهر قزوین که دارای طول و عرض جغرافیایی $36.28^{\circ} N, 50.01^{\circ} E$ می باشد را برای مطالعه موردی انتخاب می کنیم. جدول ۶ پارامترهای شهر قزوین را در طول یک سال نشان می دهد.

جدول ۶ داده های اندازه گیری شده شهر قزوین (نرم افزار PVsyst)

شده اند و باید با سیستم حفاظتی IP67 مطابقت داشته باشند تا بتوانند محیط بیرون را حفظ کنند. در جعبه ها، اجزای محافظ جانبی DC با فیوزهای HRC و SPD نصب می شوند [۷۱].

۴- یافته های تحقیق

۴-۱- نتایج طراحی بهینه فنی نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی متصل به شبکه

۴-۱-۱- نتایج تعداد پانل، اینورتر، استرینگ و آرایه ها

با توجه به اینکه مبنای طراحی را بر اساس مقیاس و ظرفیت نیروگاه ۲۵ کیلو وات در نظر گرفته ایم ولی در اصل هدف همان احداث نیروگاه ۲۰۰ کیلو وات می باشد، که با در نظر گرفتن ۸ عدد نیروگاه ۲۵ کیلو وات می توان به توان نیروگاه ۲۰۰ کیلو واتی رسید. دلیل این کار این است که اگر اینورتر یا پانلی از نیروگاه خراب شود قسمتی از نیروگاه بتواند به تولید انرژی خود ادامه دهد.

تعداد و نوع تجهیزاتی را که مورد استفاده قرار می دهیم به صورت جداول (۳) و (۴) می باشد.

جدول ۳ نوع و تعداد پانل مورد استفاده

تعداد	نام تجهیزات
عدد $400 = 50 \times 8$	پانل 500w Mono Trina solar

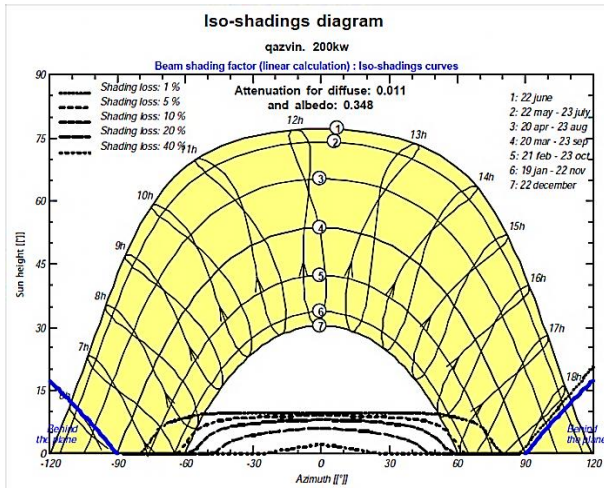
جدول ۴ نوع و تعداد اینورتر مورد استفاده

تعداد	نام تجهیزات
عدد ۸	اینورتر 25 kw Growatt MID KTL3-X متصل به شبکه

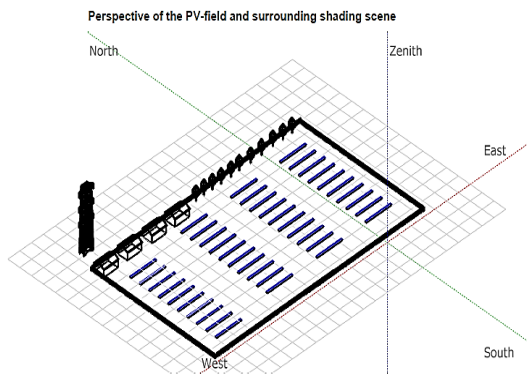
با توجه به طراحی انجام شده و اینکه نیروگاه ۲۰۰ کیلو واتی را به ۸ عدد نیروگاه ۲۵ کیلو واتی تقسیم می کنیم، پانل ها در هر قسمت به صورت ۵ ردیف که در هر ردیف ۱۰ عدد پانل سری می گردد که به پورت ورودی اینورتر متصل می شوند، یعنی در مجموع ۴۰ ردیف که در هر ردیف ۱۰ عدد پانل سری گردیده است.

۴-۱-۲- انتخاب سطح مقطع کابل

فضای نمونه ای را که در نظر میگیریم بدین صورت هست که فاصله پانل ها تا اینورترها مجموعاً ۸۰۰ متر سمت DC و از اینورتر



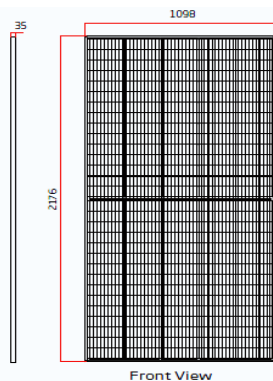
شکل ۳ نمودار تلفات سایه اندازی (نرم افزار PVSyst)



شکل ۴ شماتیک شبیه سازی نیروگاه ۲۰۰ کیلوواتی فتوولتائیک متصل به شبکه توسط نرم افزار PVSyst

۴-۲-۴- انتخاب مدل پانل

با توجه به انتخاب بهینه از بین سایر پانل های موجود در بازار ایران مدل ماژول انتخاب شده با توان نامی ۵۰۰ وات و شرکت سازنده آن Trina Solar می باشد. در شکل های ۵ و ۶ به ترتیب ابعاد پانل و منحنی مشخصه ولتاژ - جریان ماژول انتخاب شده در شدت تابش های مختلف، برای این ماژول خاص آورده شده است.



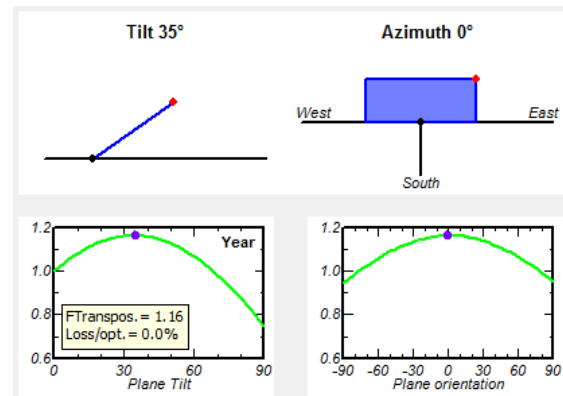
	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	83.8	29.94	-0.05	134.9	130.8	24.39	23.74	0.880
February	97.4	33.92	3.50	138.6	134.5	24.39	23.71	0.855
March	141.0	57.43	9.23	170.8	164.9	29.46	28.67	0.839
April	169.0	66.43	13.21	179.1	172.2	29.94	29.11	0.813
May	204.0	72.26	18.38	194.2	186.3	31.94	30.99	0.798
June	221.1	64.97	23.42	201.5	193.4	32.76	31.77	0.788
July	221.9	67.83	26.51	207.4	199.2	33.23	32.25	0.777
August	205.7	58.74	26.01	209.5	201.9	33.52	32.57	0.778
September	168.8	46.57	21.57	196.8	190.3	31.83	30.95	0.767
October	124.4	46.52	16.10	165.6	160.4	27.98	27.27	0.823
November	91.0	30.23	7.96	142.1	138.0	24.91	24.23	0.852
December	73.5	25.88	2.81	123.7	120.1	22.46	21.85	0.884
Year	1801.6	600.72	14.11	2064.2	1991.9	346.81	337.11	0.817

Legends: GlobHor Horizontal global irradiation
DiffHor Horizontal diffuse 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
PR Performance Ratio

۴-۲-۲- تعیین جهت و زاویه بهینه نصب صفحات

خورشیدی

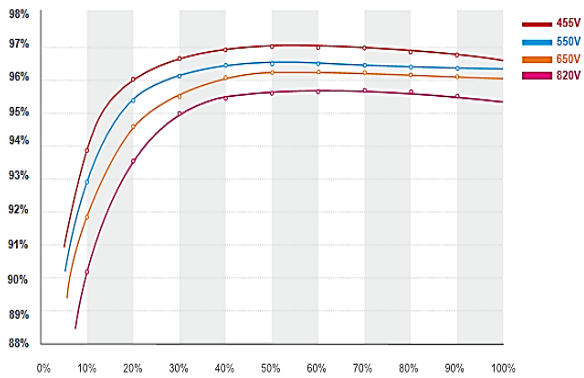
با توجه به شبیه سازی انجام شده، زاویه پنل ها در سایت مورد مطالعه ۳۵ درجه نسبت به سطح افق و رو به جنوب بودن و با آزیموت ۰ درجه آرایه ها در جهت دستیابی به بیشینه توان در نرم افزار PVSyst بدست آمده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود با زاویه و جهت فوق آرایه ها در معرض بیشینه انرژی تابشی قرار می گیرند و در نتیجه ماکزیمم توان از آنها دریافت خواهد شد.



شکل ۲ زاویه بهینه نصب و آزیموت پانل در شهر قزوین (نرم افزار PVSyst)

۴-۲-۳- تحلیل اثرات سایه اندازی

با توجه به اینکه در سایت مورد مطالعه، ساختمان و درختان متعدد و بلند وجود ندارد در نتیجه تنها اثر سایه مربوط به فاصله آرایه ها از یکدیگر می باشد. با محاسبات انجام شده در نرم افزار برای یک واحد ۲۰۰ کیلوواتی از نیروگاه، جهت دستیابی به کمترین اثر سایه فاصله بهینه ۸ متری بین آرایه ها برآورد می شود (شکل ۴). نمونه ای از شبیه سازی حرکت خورشید در مسیر مربوط در نرم افزار PVSyst جهت بررسی اثر سایه آرایه ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



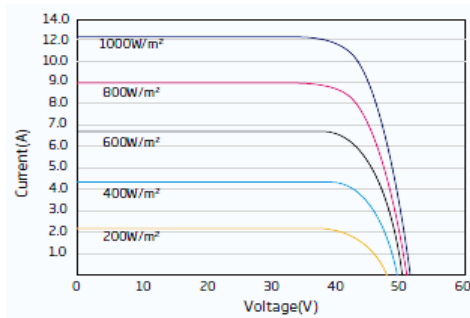
شکل ۸ نمودار بازدهی اینورتر

۴-۲-۶- برآورد میزان انرژی الکتریکی قابل تولید سالانه

از نیروگاه

در طراحی و چیدمان اولیه یک سایت خورشیدی در مرحله اول محدودیت هایی نظیر عوارض طبیعی و زیرساخت های درگیر با محدوده پروژه مد نظر قرار خواهد گرفت که پس از برآورد هزینه های اصلاح موارد درگیر با پروژه مشخص شده و طراحی و چیدمان اولیه آغاز می گردد. با توجه به چیدمان بهینه انجام شده در نرم افزار PVSyst، ظرفیت نامی قابل نصب در مساحت ۳۰۰۰ مترمربع سایت مورد مطالعه برابر ۲۰۰ کیلو وات می باشد. در نیروگاه فوق از پنل های ۵۰۰ واتی مونوکریستال به تعداد ۴۰۰ عدد استفاده شده است. نیروگاه از ۴۰ آرایه که در هر ردیف ۱۰ پانل با هم دیگر سری گردیده است. مجموع آرایه ها توسط ۸ عدد اینورتر ۲۵ کیلوواتی به پست برق نیروگاه متصل می شوند. انرژی قابل تزریق به شبکه برق در طول یک سال، با توجه به محاسبات نرم افزاری و با در نظر گیری شرایط تابش خورشید و دما در منطقه مورد مطالعه و همچنین تجهیزات در نظر گرفته شده و راندمان مربوطه به آنها و همچنین تلفات کل سامانه، در حدود ۳۳۷،۱ مگاوات ساعت در سال می باشد که به شبکه برق ملی تحویل می گردد. نمودار ماهانه تلفات دریافت انرژی و تجهیزات سیستم به نسبت انرژی تولید شده توسط اینورتر به صورت میانگین روزانه در طول یک ماه و در ۱۲ ماه مختلف سال به صورت نرمالیز شده در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق این شکل، در ماه های گرم سال به دلیل تولید بیشتر و درجه حرارت بالاتر، تلفات به ازای انرژی مؤثر تولید شده در خروجی اینورتر محسوس تر است.

شکل ۵ ابعاد ماژول انتخاب شده برحسب میلیمتر

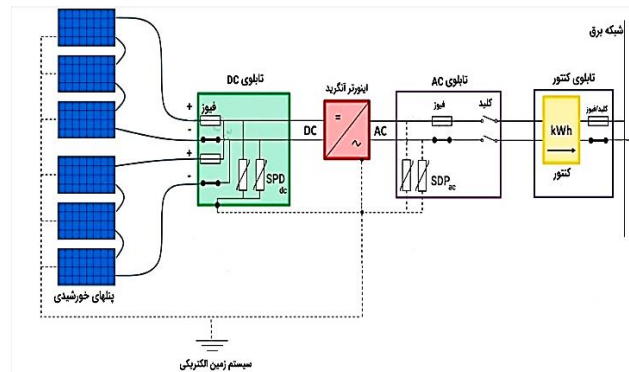


شکل ۶ منحنی ولتاژ - جریان ماژول انتخاب شده برحسب تغییرات

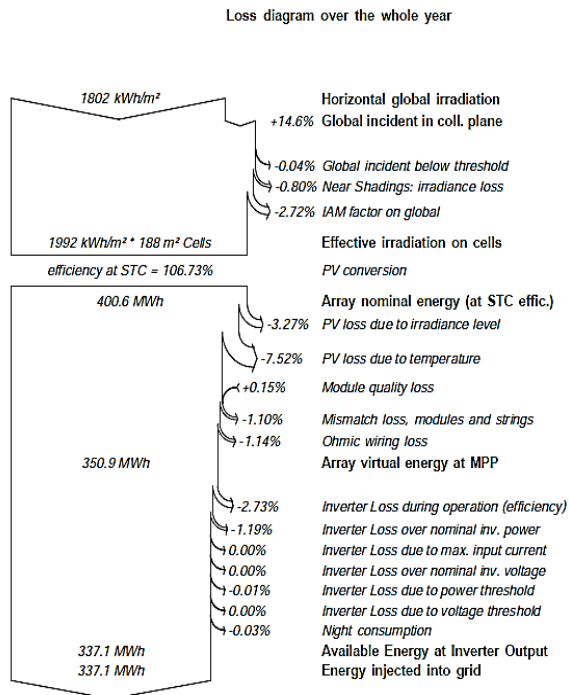
تابش خورشید در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد

۴-۲-۵- انتخاب اینورتر

با توجه به انتخاب اینورتر از میان سایر اینورترهای موجود در بازار ایران برای نیروگاه ۲۰۰ کیلو واتی مورد مطالعه می توان از اینورترهای با توان های متفاوت بهره برد. یکی از شرکت های معتبر در این زمینه، شرکت GROWATT می باشد که برای نیروگاه ۲۰۰ کیلو واتی چندین حالت را با توجه به قیمت ها و بازدهی این نوع اینورترها می توان در نظر گرفت و در نهایت اینورتر مدل MID 25KTL3-X با رنج ۲۵ کیلووات انتخاب گردید. شکل ۷ و ۸ به ترتیب نمای مکان اجزای سیستم مورد مطالعه شامل ماژول ها و اینورتر و نمودار بازدهی اینورتر انتخاب شده را نشان می دهد.



شکل ۷ مکان اجزای سیستم مورد مطالعه شامل ماژول ها و اینورتر

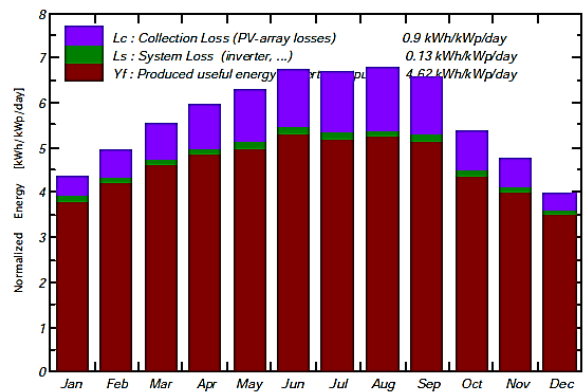


شکل ۱۱ نمودار تلفات کل نیروگاه از تابش تا تزریق انرژی به شبکه (نرم افزار PVSyst)

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش مقیاس مورد نظر طراحی نیروگاه با ظرفیت ۲۰۰ کیلو وات در نظر گرفته شده سپس مقدار و نوع تجهیزات مورد استفاده در نیروگاه خورشیدی انتخاب، طراحی و مدل سازی گردید، بدین صورت که از پانل 500 w Mono Trina solar با تعداد ۴۰۰ عدد، اینورتر 25kw Growatt MID KTL3-X با تعداد ۸ عدد، که در ۴۰ ردیف و در هر ردیف ۱۰ پانل با هم دیگر سری می گردند، هر ۵ ردیف هم به پورت های یکی از اینورترها متصل می گردد، شهر قزوین به عنوان مطالعه موردی، مورد بررسی قرار گرفت، زاویه بهینه نصب پانل 35° و زاویه بهینه آزیموت 0° می باشد. با توجه به فضای در نظر گرفته شده و طراحی های انجام شده با احتساب درصد تلفات مجاز در محاسبات کابل، طول و سطح مقطع کابل سمت DC از جنس مس و آلومنیوم به ترتیب ۸۰۰ متر، ۱۶ و ۲۵ میلی متر مربع، طول و سطح مقطع کابل سمت AC جنس مس و آلومنیوم به ترتیب ۱۰۰ متر، ۱۶ و ۲۵ میلی متر مربع خواهد بود. در ادامه برای تعیین ظرفیت بهینه نیروگاه خورشیدی، ارزیابی فنی نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک متصل به شبکه سراسری با استفاده از نرم افزار PVSyst مورد بررسی و تجزیه و تحلیل فنی قرار گرفت و تأثیر حضور نیروگاه خورشیدی ارزیابی شد و میزان انرژی تولیدی کل سالانه نقطه مورد نظر (مطالعه موردی : شهر

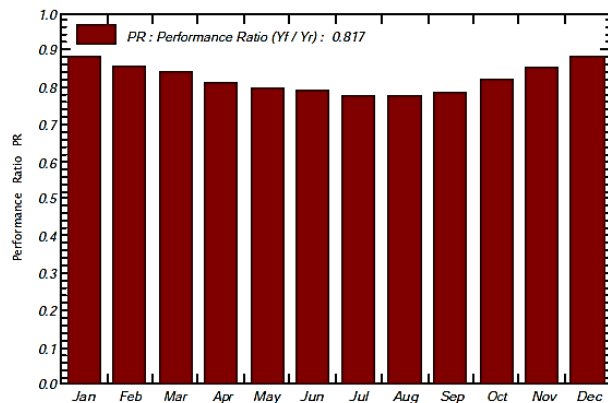
Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 200 kWp



شکل ۹ نمودار ماهانه تلفات دریافت انرژی و تجهیزات سیستم به نسبت انرژی تولید شده توسط اینورتر (نرم افزار PVSyst)

شکل ۱۰ نمایانگر ضریب عملکرد نیروگاه خورشیدی می باشد که در این مورد متوسط ضریب عملکرد برابر ۸۱ درصد می باشد. بهترین وضعیت عملکردی نیروگاه در دی ماه و برابر ۸۸ درصد است.

Performance Ratio PR



شکل ۱۰ ضریب عملکرد نیروگاه در ماه های مختلف سال (نرم افزار PVSyst)

شکل ۱۱ نمودار تلفات کل سیستم از زمان دریافت انرژی تابشی بر واحد سطح افق در محل نیروگاه تا میزان تزریق انرژی به شبکه را در طول یک سال نشان می دهد که بیشترین تلفات به علت راندمان پانل ها در شرایط استاندارد و درجه حرارت محیط می باشد. کل انرژی دریافتی از پنل ها در طول یک سال در شهر قزوین برابر ۳۳۷,۱ مگاوات ساعت می باشد.

- prediction models for output power and efficiency of grid-connected solar photovoltaic systems. *Applied Energy*. 93:319-26.
- [12] M. Chikh, A. Mahrane and F. Bouachri, PVSST 1.0 sizing and simulation tool for PV Systems. *Energy Procedia*, 6, 2011, 75- 85.
- [13] W. Margaret Amutha and V. Rajini. Tehco-economic evaluation of various hybrid power systems for rural telecom. *Renewable Energy*, 43, 2015, 553-561.
- [14] O. Erdinc, M. Uzunoglu. Optimum design of hybrid renewable energy systems: overview of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16(3): 1412-1425.
- [15] Karan Kapoor, Krishnan K. Pandey, A. K. Jain, Ashish Nandan. Evolution of solar energy in India: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 40: 475-487.
- [16] D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen, M. Leahy. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy* 2010; 87(4): 1059-1082.
- [17] Sunanda Sinha, S. S. Chandel. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 32: 192-205.
- [18] Vikrant Sharma, S.S. Chandel. Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. *Energy* 2013; 55: 476-485.
- [19] B. Shiva Kumar, K. Sudhakar. Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India. *Energy Reports* 2015; 1: 184-192.
- [20] Y. M. Irwan, A. R. Amelia, M. Irwanto, Fareq. M, W. Z. Leow, N. Gomes, I. Safwati. Stand-alone photovoltaic (SAPV) system assessment using PVSYS software. *Energy Procedia* 2015; 79: 596-603.
- [21] A.K. Shukla, K. Sudhakar, P. Baredar, Design, simulation and economic analysis of standalone roof top solar PV system in India, *Solar Energy* 136 (2016) 437- 449.
- [22] H. Heesen, V. Herbort, M. Rimpler, Performance of roof-top PV systems in Germany from 2012 to 2018, *Solar Energy* 194 (2019) 128-135.
- [23] I. Ali, G.M. Shafiullah, T. Urmee, A preliminary feasibility of roof-mounted solar PV systems in the Maldives, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 83 (2018) 18- 32.
- [24] R. Sharma, S. Goel, Performance analysis of a 11.2 kWp roof top grid-connected PV system in Eastern India, *Energy Rep.* 3 (2017) 76-84.
- [25] O. Astakhov, T. Merdzhanova, L.C. Kin, U. Rau, Room to roof: How feasible is direct coupling of solar-battery power unit under variable irradiance?, *Solar Energy* 206 (2020) 732-740
- [26] A. Ballaji, M.H. Ananda, K.N. Swamy, B.S.V. Murthy, Design, analysis and economic investigation of standalone roof top solar PV system for Rural India, *Int. J. Appl. Eng. Res.* ISSN 0973-4562 13 (19) (2018) 14461-14468.
- [27] J.R.S. Brownson. Chapter 08 - Measure and Estimation of the Solar Resource. In: J.R.S. Brownson (ed). *Solar Energy Conversion Systems*. Academic Press: Boston, (2014) 199-235.
- [28] N. Belakhdar, M. Kharbach, M.E. Afilal, The renewable energy plan in Morocco, a Divisia index approach, *Energy Strategy Rev.* 4 (2014) 11-15.
- [29] R. de Arce, R. Mahía, E. Medina, G. Escribano, A simulation of the economic impact of renewable energy development in Morocco, *Energy Policy* 46 (2012) 337,1 قزوین) با در نظر گرفتن تلفات مشخص گردید که حدود ۳۳۷,۱ مگاوات ساعت در سال بدست آمد.

۶- تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از پایان نامه " با عنوان طراحی فنی و اقتصادی بهینه نیروگاه های خورشیدی متصل به شبکه " در مقطع دکتری تخصصی است که با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین اجرا شده است. نویسندگان از کمک ارزشمند کارشناسان وزارت نیرو در ایران، شرکت توزیع برق و غیره قدردانی می کنند. همچنین از شرکت برق منطقه ای استان کردستان به خاطر نظرات مفید و مساعدشان در تهیه این مقاله تشکر و قدردانی می شود.

۷- مراجع

- [1] Mayer, Martin János, and Gyula Gróf. 2020 "Techno-economic optimization of grid-connected, ground-mounted photovoltaic power plants by genetic algorithm based on a comprehensive mathematical model." *Solar Energy* 202: 210-226.
- [2] Mayer, Martin János. 2020 "Design optimization and power forecasting of photovoltaic power plants.".
- Miranda RFC, Szklo A, Schaeffer R. 2015. Technical-economic potential of PV systems on Brazilian rooftops. *Renewable Energy*. 75:694-713.
- [3] Paudel AM, Sarper H. 2013. Economic analysis of a grid-connected commercial photovoltaic system at Colorado State University-Pueblo. *Energy*. 52:289-96.
- [4] Bortolini M, Gamberi M, Graziani A, Mora C, Regattieri A. 2013. Multi-parameter analysis for the technical and economic assessment of photovoltaic systems in the main European Union countries. *Energy Conversion and Management*. 74:117-28
- [5] Miranda RFC, Szklo A, Schaeffer R. 2015. Technical-economic potential of PV systems on Brazilian rooftops. *Renewable Energy*. 75:694-713.
- [6] Edalati S, Ameri M, Iranmanesh M, Tarmahi H, Gholampour M. 2016. Technical and economic assessments of grid-connected photovoltaic power plants: Iran case study. *Energy*. 114:923-34.
- [7] Edalati, Saeed, et al. 2016 "Technical and economic assessments of grid-connected photovoltaic power plants: Iran case study." *Energy* 114: 923-934.
- [8] De Soto W, Klein SA, Beckman WA. 2006. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*. 80:78-88.
- [9] Demoulias C. 2010. A new simple analytical method for calculating the optimum inverter size in grid-connected PV plants. *Electric Power Systems Research*. 80:1197-204.
- [10] Davila-Gomez L, Colmenar-Santos A, Tawfik M, Castro-Gil M. 2014. An accurate model for simulating energetic behavior of PV grid connected inverters. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 49:57-72.
- [11] Su Y, Chan L-C, Shu L, Tsui K-L. 2012. Real-time

- Scale Solar Power Plants, *Sol. Energy*, 19, pp. 759–762.
- [49] Mondol JD, Yohanis YG, Norton B. Comparison of measured and predicted long term performance of grid a connected photovoltaic system. *Energy Convers Manag* 2007;48:1065e80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2006.10.021>.
- [50] Quesada B, Sanchez C, Canada J, Royo R, Paya J. Experimental results and simulation with TRNSYS of a 7.2 kWp grid-connected photovoltaic system. *Appl Energy* 2011;88:1772e83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.011>.
- [51] Khatib, T., Mohamed, A., Sopian, K., 2013. A review of photovoltaic systems size optimization techniques. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 22, 454–465. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.023>.
- [52] Sulaiman, S.I., Rahman, T.K.A., Musirin, I., Shaari, S., Sopian, K., 2012. An intelligent method for sizing optimization in grid-connected photovoltaic system. *Sol. Energy* 86, 2067–2082. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.04.009>.
- [53] Notton, G., Lazarov, V., Stoyanov, L., 2010. Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations. *Renew. Energy* 35, 541–554. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.013>.
- [54] Chen, S., Li, P., Brady, D., Lehman, B., 2013. Determining the optimum grid-connected photovoltaic inverter size. *Sol. Energy* 87, 96–116. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.09.012>.
- [55] Aronescu, A., Appelbaum, J., 2017. Design optimization of photovoltaic solar fields-insight and methodology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76, 882–893. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.079>.
- [56] Vokony, I., Hartmann, B., Talamon, A., Papp, R.V., 2018. On selecting optimum tilt angle for solar photovoltaic farms. *Int. J. Renew. Energy Res.* 8, 1926–1935.
- [57] Mohamed A. Eltawil, Zhengming Zhao. Grid-connected photovoltaic power systems: technical and potential problems-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14: 112-129.
- [58] PVsyst User Manual. <URL: <http://files.pvsyst.com/help/>>
- [59] Y.M. Irwana, A.R. Amelias, M. Irwantoa, F. Ma, W.Z. Leowa, N. Gomesha, I. Safwati, Stand-alone photovoltaic (SAPV) system assessment using PVSYSY software, *Energy Procedia* 79 (2015) 596–603.
- [60] Sharma, V., Chandel, S.S., 2013. Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. *Energy* 55 (C), 476–485, Elsevier.
- [61] P. Karki, B. Adhikary and K. Sherpa. Comparative study of grid-tied photovoltaic (PV) system in Kathmandu and Berlin using PVsyst. *IEEE ICSET* 2012, Nepal.
- [62] S. Amstrong, M.E. Glavin and W.G. Hurley, Comparison battery charging algorithms for stand-alone photovoltaic system. 2008 *IEEE*.
- [63] Vikrant Sharma, S.S. Chandel. Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. *Energy* 2013; 55: 476-485.
- [64] B. Shiva Kumar, K. Sudhakar. Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India. *Energy Reports* 2015; 1: 184-192.
- [65] Ayompe LM, Duffy A, Mc Cormack SJ, Conlon M. Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland. *Energy* 335–345.
- [30] A.A. John, P.V. Kumar. The Diagnosis for the Lack of Remote Village Electrification Using Sustainable Energy in Labranzagrande.
- [31] M. Nfaoui, K. El-Hami, Extracting the maximum energy from solar panels, *Energy Rep.* 4 (2018) 536–545.
- [32] M.P. Utrillas, J.A. Martinez-Lozano, Performance evaluation of several versions of the Perez tilted diffuse irradiance model, *Solar Energy* 53 (1994) 155–162.
- [33] Kandpal, Tara C., Broman, Lars, 2014. Renewable energy education: A global status review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 34 (C), 300–324, Elsevier.
- [34] Johansson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N., Williams, R.H., 1993. Renewable energy: sources for fuels and electricity. *Energy Stud. Rev.* 4 (3), 6, 201-212.
- [35] Alam, M., Muttaqi, K., Sutanto, D., 2013. Mitigation of rooftop solar PV impacts and evening peak support by managing available capacity of distributed energy storage systems. *IEEE Trans. Powersyst.* 28 (4), 3874–3884.
- [36] Shukla, A.K., Kumar, A., Sudhakar, K., Baredar, P., 2016a. Exergetic analysis of building integrated semitransparent photovoltaic module in clear sky condition at Bhopal India. *Case Stud. Therm. Eng.* 8, 142–151, Elsevier.
- [37] Shukla, A.K., Kumar, A., Sudhakar, K., Baredar, P., 2016b. Exergetic assessment of BIPV module using parametric and photonic energy methods. *Energy Build.* 119, 62–73, Elsevier.
- [38] Shukla, A.K., Kumar, A., Sudhakar, K., Baredar, P., Mamat, R., 2018. Solar PV and BIPV system: Barrier, challenges and policy recommendation in India. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 3314–3322, Elsevier.
- [39] Shukla, A.K., Sudhakar, K., Baredar, P., 2017a. Recent advancement in BIPV product technologies: A review. *Energy Build.* 140, 188–195, Elsevier.
- [40] Sharma, R., Goel, S., 2011. Performance analysis of a 11.2 kWp roof top grid-connected PV system in Eastern India. *Energy Rep.* 3, 76–84.
- [41] Sharma, V., Chandel, S.S., 2013. Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. *Energy* 55 (C), 476–485, Elsevier
- [42] J.R.S. Brownson. Chapter 08 - Measure and Estimation of the Solar Resource. In: J.R.S. Brownson (ed). *Solar Energy Conversion Systems*. Academic Press: Boston, (2014) 199–235.
- [43] T. Kousksou, A. Allouhi, M. Belattar, A. Jamil, T. El Rhafiki, A. Arid et al. Renewable energy potential and national policy directions for sustainable development in Morocco. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47 (2015) 46–57.
- [44] R. de Arce, R. Mahía, E. Medina, G. Escibano. A simulation of the economic impact of renewable energy development in Morocco. *Energy Policy*, 46 (2012) 335–345.
- [45] M. Nfaoui, K. El-Hami. Extracting the maximum energy from solar panels. *Energy Reports*, 4 (2018) 536–545.
- [46] R. Cantoni, K. Rignall. Kingdom of the Sun: a critical, multiscale analysis of Morocco's solar energy strategy. *Energy Research & Social Science*, 51 (2019) 20–31.
- [47] M.P. Utrillas, J.A. Martinez-Lozano. Performance evaluation of several versions of the Perez tilted diffuse irradiance model. *Solar Energy*, 53 (1994) 155–162.
- [48] Barra, Conti, Santamata, Scarmozzino, and Visentin, (1977), Shadow Effect in Large Solar Collectors in Large

- Conversion and Management 2011; 52: 816-825.
- [66] S. Eyigun, O. Guler, Turkey solar potential and viability of solar photovoltaic power plant in Central Anatolia, Int. Renewable Energy Congr. (2010) 94-99.
- [67] M. Ramli, A. Hiendro, K. Sedraoui, and S. Twaha, Optimal sizing of grid-connected photovoltaic energy system in Saudi Arabia. Renewable Energy, 75 (2015) 489-495.
- [68] Srisavitr solar, 2014. Mono crystalline photovoltaic modules. 250Wp datasheet.
- [69] IEEE, 2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Std. 80 2000(Revision of IEEE Std 80-1986).
- [70] Mersen, 2015. Surge-trap pluggable STPT2 series - 40kA PV. DS-STPT2-40KPV- 06-0518-EN datasheet.
- [71] CITEL, 2014. 3-phase type 2 surge protector. DS440 series datasheet.
- [72] Littlefuse, 2018. SPF series solar fuses. Power-Gard fuse dtasheet, Rev:4-I- 071118.
- [73] Gibson, J.W., 1941. The high-rupturing-capacity cartridge fuse, with special reference to short-circuit performance. J. Inst. Electr. Eng. - II Power Eng. 88 (1), 2-24.