نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۹ شماره ۵، زمستان ۱۴۰۱، ص: ۸۵- ۱۰۴

J. Energy Conversion
Volume: 9, Issue: 5, 2023: 85−104

DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4

طراحی بهینه و امکان‌سنجی اقتصادی نیروگاه خورشیدی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه با ظرفیت ۲۰۰ کیلووات در شهر سنندج

پدرام احدی[۱]، فربد فخرآبادی[۲]*، علیرضا پورشقاقی[۳]، فرشاد کوثری[۴]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران، (pedram.ahadi91@gmail.com)
*۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران، (Farbod.Fakhrabadi@iau.ac.ir)
۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران، (apourshaq@gmail.com)
۴- استاد، گروه مهندسی مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران، (farshad.kowsary@gmail.com)

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰

چکیده

توسعه کاربرد انرژی خورشیدی در کشور و مخصوصا توسعه احداث نیروگاه‌های خورشیدی بدون پتانسیل‌سنجی تابش خورشیدی و شناسایی دقیق مناطق با تابش مناسب و استخراج داده‌های معتبری که بتواند میزان و توزیع این انرژی را تعیین کند، امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این مقاله طراحی بهینه و امکان‌سنجی احداث نیروگاه ۲۰۰ کیلوواتی شهر سنندج با در نظر گرفتن مطالعات اقتصادی آن مورد مطالعه قرار گرفته شده است. در این پژوهش، محاسبه میزان انرژی خورشیدی دریافتی و طراحی بهینه نیروگاه از نرم افزار PVsyst و برای محاسبات امکان‌سنجی اقتصادی آن از نرم افزار Retscreen استفاده شده است. بدین منظور با توجه به موقعیت جغرافیایی محل احداث نیروگاه در شهر سنندج، چیدمان آرایه‌های فتوولتائیک جهت جلوگیری از سایه‌افکنی پنل ها و اشغال کمترین مساحت ممکن طراحی و بهینه‌سازی شده است که این امر موجب کاهش هزینه‌های سیستم و افزایش بهره وری نیروگاه از پتانسیل خورشیدی موجود می‌گردد. در ادامه، منحنی خروجی شامل میزان تولید انرژی سالیانه، تلفات و سایه افکنی استخراج و تحلیل شده و به عنوان یکی از ورودی‌های امکان سنجی اقتصادی استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با توجه به ظرفیت بالای تولید انرژی در منطقه مورد مطالعه، از نظر اقتصادی نیز نرخ بازگشت سرمایه در حد مطلوبی قرار دارد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** Farbod.Fakhrabadi@iau.ac.ir

کلمات کلیدی: نیروگاه خورشیدی فوتوولتاییک متصل به شبکه، طراحی بهینه، امکان‌سنجی اقتصادی، PVsyst، Retscreen

۱- مقدمه

انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و از مهم ترین آن ها می‌باشد. محدودیت منابع فسیلی و پیامدهای حاصل از تغییرات زیست محیطی و آب و هوای جهانی، فرصت های مناسبی را برای رقابت انرژی خورشیدی با انرژی های فسیلی‌خصوصاً در کشورهایی با پتانسیل بالای تابش ایجاد نموده است.

میزان تابش انرژی خورشیدی در نقاط مختلف جهان متغیر بوده و در کمربند خورشیدی زمین بیشترین مقدار را داراست[۱]. کشور ایران نیز در نواحی پرتابش واقع است و مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از تجهیزات خورشیدی در ایران مناسب بوده و می‌تواند بخشی از انرژی مورد نیاز کشور را تأمین نماید. کشور ایران در بین مدارهای ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی قرار گرفته

نحوه استناد به این مقاله: پدرام احدی، فربد فخرآبادی، علیرضا پورشقاقی، فرشاد کوثری. طراحی بهینه و امکان‌سنجی اقتصادی نیروگاه خورشیدی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه با ظرفیت ۲۰۰ کیلووات در شهر سنندج. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۱; ۹ (۵) :۸۵-۱۰۴.
DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

است و در منطقه‌ای واقع شده که به لحاظ دریافت انرژی خورشیدی در بین نقاط جهان در بالاترین رده‌ها قرار دارد. میزان تابش خورشیدی در ایران حدود ۵/۴ کیلووات ساعت بر متر مربع در سال تخمین زده شده است که البته بالاتر از میزان متوسط جهانی است. از طرفی در ایران به طور سالیانه بیش از ۲۸۰ روز آفتابی گزارش شده است که بسیار قابل توجه می‌باشد[۲].

با توجه به اینکه هزینه اولیه احداث نیروگاه‌های خورشیدی بالا می‌باشد، طراحی بهینه اجزای اصلی نیروگاه و برآوردهای اقتصادی آن به منظور بازگشت سرمایه سریعتر امری بسیار ضروری می‌باشد. علی‌رغم اینکه مقالات بسیاری به بررسی نیروگاه خورشیدی و شبیه‌سازی و محاسبه توان خروجی آن پرداخته‌اند ولی طراحی بهینه و مطالعات اقتصادی احداث یک نیروگاه مورد نظر نبوده است.

شمس و همکاران طراحی یک نیروگاه فوتوولتائیک ۱۰۰ کیلوواتی متصل به شبکه در تهران را مورد بررسی قرار دادند که روشی اجرایی برای انتخاب ابعاد بهینه اجزای نیروگاه فتوولتائیک با در نظر گرفتن قیود حاکم بر اجزای نیروگاه نظیر ولتاژ و توان خروجی پنل، محدوده ولتاژ و جریان ورودی اینورتر را پیشنهاد دادند[۳]. اسحاق و همکاران به شبیه‌سازی یک مزرعه خورشیدی در جعبه ابزار سیمولینک نرم افزار MATLAB پرداخته اند آن ها کاربرد بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) را برای ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT) سیستم فتوولتائیک (PV) با استفاده از روش کنترل مستقیم ارائه کردند نتایج شبیه سازی آن ها نشان داد که کنترل کننده پیشنهادی نسبت به روش های دیگر برای همه انواع شرایط محیطی عملکرد بهتری دارد[۴]. بارا و همکاران مدلی برای نیروگاه خورشیدی با در نظر گرفتن اثر سایه پیشنهاد کردند که در این کار به تشریح و بحث تحلیل عددی کلکتورهای سهموی خورشیدی با ردیاب پرداختند آن ها یک راه حل بهینه برای استقرار کلکتور در یک منطقه میدانی معین برای حداکثر انرژی مطلوب ارائه دادند که منجر به استقرار بهینه کلکتورها در یک منطقه معین (شامل زاویه شیب، اندازه کلکتور، فاصله بین کلکتورها و تعداد ردیف های جمع کننده) شد[۵]. حقبین و همکاران به بررسی هارمونیکی یک نیروگاه ۱۰۰ کیلوواتی متصل به شبکه مورد پرداختند که در آن حالت های مختلف بار محلی کمتر یا بیشتر از توان تولیدی نیروگاه برای بار محلی خطی و غیرخطی بررسی و مطالعات هارمونیکی انجام شده است نتایج نشان می دهد که شبکه سهم بیشتری در تامین اعوجاج جریان بار دارد که دلیل این موضوع به تدابیر کنترلی در اینورتر فتوولتائیک جهت تولید جریان سینوسی برمی گردد. برای کاهش اعوجاج در نقطه اتصال به شبکه می توان اینورترفتوولتائیک را به صورت فیلتر اکتیو نیز کنترل نمود[۶]. عباس پور و همکاران ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی نیروگاه‌های با کمک نرم افزار RETScreen با توجه به قانون هدفمندی یارانه ها مورد بررسی قرار دادند که نتیجه گرفتند بر این اساس بهره گیری از فناوری های نوین در خصوص باتری و پانل ها و اتخاذ سیاست های حمایتی از طرف دولت می تواند زمان بازگشت سرمایه را در حد مطلوب کاهش دهد[۷]. عدالتی و همکاران از داده های واقعی یک نیروگاه ۱۰ مگاواتی برای آنالیز اقتصادی و همچنین استخراج یک مدل نهایی برای تعیین بهینه پارامترهای یک نیروگاه خورشیدی استفاده کردند در این کار رفتار قطعات اصلی یک سیستم PV متصل به شبکه بر اساس مطالعات نظری و میدانی در ایران بررسی شده است. به منظور پیش بینی توان خروجی از نیروگاه PV ، یک کد کامپیوتری با داده های تجربی اعتبارسنجی شده و نتایج خوبی مشاهده شده است که بر اساس تجزیه و تحلیل LCOE نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی برای موقعیت های جغرافیایی مختلف ایران، مناسب ترین سایت نصب نیروگاه PV متصل به شبکه در کرمان انتخاب شد[۸]. ژانگ و همکاران با استفاده از داده های هواشناسی یک مدل بهینه جهت پیش بینی های هواشناسی برای مکان یابی بهینه اجرای نیروگاه های تجدیدپذیر را ارائه دادند که در آن یک الگوریتم بهینه سازی ترکیبی جدید برای اندازه گیری مکان بهینه خورشیدی هیبریدی مستقل پیشنهاد شده است، نتایج نشان داد که بهینه‌سازی جستجوی ترکیبی پیشنهادی الگوریتم-CS-HS-SA) (ANNنتایج بهتری نسبت به روش های دیگر دارد و از این آلگوریتم می توان به طور موثر برای بهینه سازی سیستم های انرژی هیبریدی استفاده کرد[۹]. رحمان و همکاران مطالعات امکان سنجی یک نیروگاه ۱۰ مگاواتی در عربستان را انجام دادند، این مطالعه جنبه های فنی، زیست محیطی و اقتصادی را برای انتخاب مکان های مناسب برای ساخت نیروگاه های فتوولتائیک متصل به شبکه ۱۰ مگاواتی با ظرفیت نصب شده در عربستان سعودی ارائه می دهد که بیشا و نجران به عنوان بهترین مکان ها معرفی شدند[۱۰]. شاهینور و همکاران مطالعات موردی در فرانسه برای بهره برداری از نیروگاه های خورشیدی در ساختمان های بلند

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

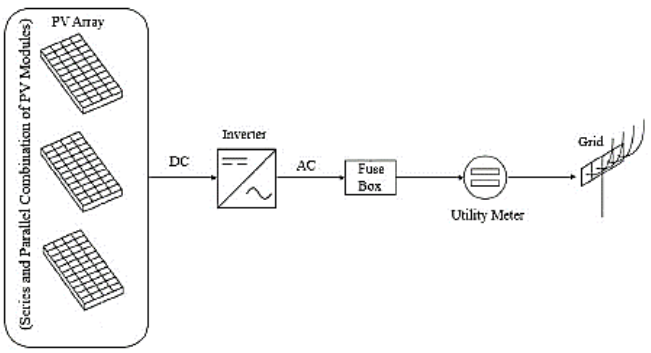
را انجام دادند این مطالعه بر تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی بازسازی سیستم تامین انرژی یک ساختمان اداری بزرگ متصل به شبکه از طریق یک سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی (HRES) تاکید می کند به طوری که بر چگونگی به حداقل رساندن مصرف برق از شبکه با تولید هرچه بیشتر انرژی تجدیدپذیر متمرکز شده است و علاوه بر آن اثرات اقتصادی یکپارچه سازی وسایل نقلیه سبز مانند اتومبیل های هیدروژنی، اتومبیل های الکتریکی و غیره را که ضروری هستند نیز بررسی می کنند[۱۱]. امانوئل و همکاران با توجه به اهمیت جنبه اقتصادی در یک نیروگاه ۱۰ کیلوواتی در یک مدرسه از جنبه اقتصادی را مورد مطالعه قرار دادند به طوری که این سیستم از ۴۰ پنل و دو عدد اینورتر ۵ کیلوواتی با قابلیت ارتباط تشکیل شده است در حالی که شبکه توزیع به عنوان یک ذخیره سازی مجازی عمل می کند. برق مازاد تولید شده در شرایط بار کم در طول تعطیلات و آخر هفته ها به شبکه صادر می شود[۱۲]. بارتوس و همکاران به مطالعه موردی درباره بهره برداری از نیروگاه خورشیدی در گلخانه های کشاورزی از منظر اجتماعی و اقتصادی پرداختند که در آن تاثیرات اقلیمی به عنوان یک عامل مهم در بازدهی نیروگاه های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است[۱۳]. چاندر و همکاران، شارما و همکاران، دوبی و همکاران یکی از عوامل مهم در بازدهی نیروگاه های خورشیدی که دمای سطح پنل های خورشیدی است را به طور کامل مورد بررسی قرار دادند و تاثیر دمای سطح پنل ها را بر بازدهی نیروگاه های خورشیدی تحلیل و بررسی نمودند[۱۶-۱۴].

در بررسی حاضر تحلیل سایه‌اندازی، چیدمان پنل ها، طراحی مهندسی پایه و حتی انتخاب بهینه سطح مقطع کابل و در ادامه نیز بررسی اقتصادی طرح مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در این مقاله به بررسی وضعیت استفاده از انرژی خورشید در ایران بر اساس جدیدترین اطلاعات، طراحی بهینه نیروگاه ۲۰۰ کیلوواتی در شهر سنندج توسط نرم افزار PVsyst و امکان‌سنجی اقتصادی طرح در نرم افزار Retscreen ارائه خواهد شد.

۲- طراحی بهینه سیستم خورشیدی فتوولتائیک متصل به شبکه ۲۰۰ کیلووات

در این پژوهش 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 پنلی از نیروگاه کارایی خود را از دست دهد و یا نیاز به تعمییر داشته باشد، قسمتی از نیروگاه بتواند به تولید انرژی خود ادامه دهد. در فضای نمونه در نظر گرفته شده فاصله پنل ها تا اینوترها مجموعا ۵۰ متر سمت DC و از اینوتر تا کنتور مجموعا ۱۰۰ متر سمت AC در نظر گرفته می شود. در شکل (۱) یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه نشان داده شده است. عناصر اصلی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه شامل ماژول های PV، اینورترها، جعبه فیوز، کنتور برق و خطوط شبکه هستند. پنل 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[۱۷].



شکل ۱ : چیدمان سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

۲-۱- روش شبیه سازی با نرم افزار PVsyst

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 سازد. خروجی مبتنی بر شبیه سازی سیستم اندازه گیری می باشد که بیشتر به موقعیت جغرافیایی سایت سیستم PV بستگی دارد. نتایج ممکن است شامل چندین متغیر شبیه سازی باشند که می توانند در مقادیر ماهانه، روزانه یا ساعتی نمایش داده شوند. "نمودار تلفات" نقاط ضعف در طراحی سیستم را پیش بینی می کند[۱۸،۱۹]. شارما و همکاران در نرم افزار PVsyst نتایج خوبی را برای اندازه گیری اولیه اینورتر و پنل PV ارائه دادند که در آن به نتایج خوبی برای بدست آوردن حداکثر انرژی تولید شده در ماه های مختلف سال دست پیدا کردند[۲۰]. برای انجام شبیه سازی با استفاده از نرم افزار PVsyst اطلاعات مربوط به تابش یا تابش خورشیدی، دمای محیط، سرعت باد و پارامترهای فیزیکی پنل 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 پنل های PV را فراهم می کند به طوری که اینورتر و پنل PV انتخابی نباید کمتر یا بیشتر از حدود اندازه گیری طراحی 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، مشخصات اینورتر، سایه‌زنی و غیره. پارامترهای خروجی شبیه سازی نرم افزار PVsyst به این شرح می باشند: داده های هواشناسی، کارایی و تلفات مختلف، نسبت عملکرد، تولید انرژی، تعادل انتشار کربن، ارزیابی مالی و غیره.

۲-۲- انتخاب پنل فتوولتائیک

حال بر اساس انتخاب پنل و اینورتر، 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[۲۱].

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

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

۲-۳- 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 مبدل MPPT است[۲۲]. 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:

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

۲-۴- طراحی تعداد استرینگ و آرایه ها

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

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

که V_{max} و V_{oc} به ترتیب ماکزیمم ولتاژ اینورتر و ولتاژ مدار باز پانل می باشند که در داخل دیتا شیت اینورتر و پنل این مقادیر موجود می باشند. $V_{oc@\ coldest}$ ولتاژ مدار باز پنل در سردترین دما که برای محاسبه آن ولتاژ مورد نظر در یک ضریب ۲۰٪ ضرب خواهد گردید. تعداد مینیمم پنل هایی که در کنار هم می توانیم در یک ردیف از نیروگاه سری کنیم به صورت:

$$N_{min} > \frac{V_{\min\ DC\ inverter}}{V_{mp}} \quad (۴)$$

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

$$N_{min} < \text{تعداد پانل ها} < N_{max} \quad (۵)$$

با توجه به رنج ولتاژی اینورتر V_{max} و V_{min} ، V_{mp} پنل که در دیتا شیت های مربوطه موجود می باشند ، همچنین مقادیر N_{max} و N_{min} تعداد حداکثر و حداقل پنل 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 پنل I_{sc} که هر کدام در دیتا شیت اینورتر یا پنل 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 [۲۷-۲۳].

۲-۵- انتخاب و طراحی سیم و کابل

یک فضای نمونه برای نیروگاه در نظر خواهیم گرفت، و با توجه به آن فاصله پنل 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 معمولا تک فاز می باشند، اگر در داخل آپارتمان ها از آسانسور استفاده گردد شامل ۳ فاز خواهد شد. نیروگاه های 5KW به بالا همگی ۳ 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 :

$$I_c = \frac{I_n}{K.F} \quad (۶)$$

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

جدول ۱ : تعداد رشته کابل با توجه به ضریب مجاورت K

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

ضریب تصحیح حرارتی :

$$F = \sqrt{\frac{(70-T)}{50}} \quad \text{برای کابل کشی زمینی} \quad (۷)$$

که T دمای محیط برابر 25 °C می باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

$$F = \sqrt{\frac{(70-T)}{40}} \quad \text{برای کابل کشی هوایی} \qquad (۸)$$

برای سمت AC در حالت تک فاز :

$$I = \frac{P}{V\ cos\emptyset} \qquad (۹)$$

که P توان اینورتر (w) و V ولتاژ در حالت تک فاز 230v و مقدار $\boldsymbol{cos\emptyset}$ برابر ۰/۹ می باشند.

برای سمت AC در حالت سه فاز :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\ V\ cos\emptyset} \qquad (۱۰)$$

که در آن P توان اینورتر (w) ، V ولتاژ در حالت سه فاز 400v و مقدار $\boldsymbol{cos\emptyset}$ برابر ۰/۹ 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:

$$\boldsymbol{S = \frac{0.04 \times L \times I}{\frac{V}{20}}} \qquad (۱۱)$$

که در آن S سطح مقطع کابل بر حسب میلی متر مربع، L طول کابل بر حسب متر، I شدت جریان جاری در کابل بر حسب آمپر، V ولتاژی که سیستم بر اساس آن طراحی شده است.

بهترین و مرسوم ترین روش استفاده از جدول می باشد. در این روش ابتدا جریانی که در مرحله اول بدست آمد $\boldsymbol{I_c}$ و بر اساس مقدار متراژ یا مسافت می توان به نمره ی کابل دست پیدا کرد(جدول (۲)).

۳. افت ولتاژ هادی در حالت *DC* و تک فاز:

$$\Delta u\% = \frac{2 \times L \times P}{u^2 \times S} \times 1.786 \qquad (۱۲)$$

که در آن $\boldsymbol{\Delta u\%}$ 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،

$$u = \text{تعداد پانل یک ردیف} \times V_{mp,panel} \qquad (۱۳)$$

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:

$$\Delta u\% = \frac{L \times P}{u^2 \times S} \times 1.786 \qquad (۱۴)$$

در حالت سه فاز، هادی از جنس آلومنیوم:

$$\Delta u\% = \frac{L \times P}{u^2 \times S} \times 2.857 \qquad (۱۵)$$

در فرمول فوق حداکثر ولتاژ هادی باید کمتر از ۲٪ باشد یعنی ($\boldsymbol{\Delta u\% < 2\%}$)

همچنین 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 آلومنیومی، نسبت به مسافت و جریان مجاز

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

۱۰۰۰	۹۰۰	۸۰۰	۷۰۰	۶۰۰	۵۰۰	۴۵۰	۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۵۰	۱۰	الومنیوم	مس
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۵	۷	۱۵	۲۷	۲,۵	۱,۵
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۶	۸	۱۲	۲۵	۳۶	۴	۲,۵
-	-	-	-	-	-	-	-	-	۸	۸	۱۰	۱۳	۲۰	۴۰	۴۶	۶	۴
-	-	-	-	۵	۶	۶,۵	۷	۸	۱۰	۱۲	۱۵	۲۰	۳۰	۵۸	۵۸	۱۰	۶
۵	۶	۷	۸	۱۰	۱۰	۱۱	۱۲	۱۴	۱۸	۲۰	۲۵	۳۳	۵۰	۷۷	۷۷	۱۶	۱۰
۸	۱۰	۱۱	۱۳	۱۶	۱۶	۱۷	۲۰	۲۲	۲۶	۳۲	۴۰	۵۳	۸۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۵	۱۶
۱۲	۱۳	۱۵	۱۷	۲۰	۲۵	۲۷	۳۱	۳۵	۴۱	۵۰	۶۲	۸۳	۱۲۵	۱۳۰	۱۳۰	۵۰	۲۵
۱۷	۱۸	۲۱	۲۴	۲۸	۳۴	۳۸	۴۳	۴۹	۵۷	۶۹	۸۶	۱۱۵	۱۵۵	۱۵۵	۱۵۵	۷۰	۳۵
۲۳	۲۵	۲۸	۳۲	۳۸	۴۶	۵۲	۵۸	۶۶	۷۸	۹۳	۱۱۷	۱۵۸	۱۸۵	۱۸۵	۱۸۵	۹۵	۵۰
۳۳	۳۶	۴۱	۴۷	۵۵	۶۶	۷۴	۸۳	۹۵	۱۱۱	۱۳۳	۱۶۶	۲۲۲	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۱۲۰	۷۰
۴۵	۵۰	۵۸	۶۴	۷۵	۹۰	۱۰۰	۱۱۲	۱۲۹	۱۵۰	۱۸۰	۲۲۵	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵	۱۵۰	۹۵
۵۵	۸۷	۶۹	۸۹	۹۲	۱۱۱	۱۲۳	۱۳۹	۱۵۹	۱۸۵	۲۲۲	۲۷۵	۳۱۵	۳۱۵	۳۱۵	۳۱۵	۱۸۵	۱۲۰
۶۶	۷۳	۸۲	۹۴	۱۱۰	۱۳۲	۱۴۷	۱۶۵	۱۸۹	۲۲۰	۲۶۴	۳۳۰	۳۵۵	۳۵۵	۳۵۵	۳۵۵	۲۴۰	۱۵۰
۷۸	۸۷	۹۸	۱۱۲	۱۳۱	۱۵۷	۱۷۶	۱۹۸	۲۲۴	۲۶۷	۳۱۴	۳۹۳	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۱۸۵
۸۷	۹۷	۱۰۹	۱۲۴	۱۴۵	۱۷۴	۱۹۴	۲۱۸	۲۴۹	۲۹۱	۳۴۹	۴۳۷	۴۶۵	۴۶۵	۴۶۵	۴۶۵	۴۰۰	۲۴۰
۹۹	۱۱۰	۱۲۴	۱۴۱	۱۶۵	۱۸۹	۲۲۰	۲۴۸	۲۸۳	۳۳۱	۳۹۷	۴۹۶	۵۵۰	۵۵۰	۵۵۰	۵۵۰	۵۰۰	۳۰۰

۲-۶- استراکچر پنل های فتوولتائیک

با توجه به وزن هر پنل برای پشتیبانی از پنل های PV سنگین با زاویه 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. این استراکچرها باید مطابق تست استاندارد IP67 باشند، که در برابر گرد و غبار و اثرات غوطه ور شدن موقت در آب تا عمق ۳ فوت تا ۳۰ دقیقه ایمن هستند[۲۸].

۲-۷- انتخاب ارتینگ و اجزاء حفاظتی

برای جلوگیری از تلفات در هنگام اتصال کوتاه و صاعقه به زمین حفاظت نیاز است. اتصال زمین برای از بین بردن جریان اضافی تولید شده در اتصال کوتاه ارائه می شود. اتلاف 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 عیب آن این است که نمک و زغال چوب به خاک می‌رسد، بنابراین نیاز به نگهداری منظم دارد. از ارت شیمیایی برای جلوگیری از تعمیر و نگهداری منظم استفاده می شود. از ارتینگ شیمیایی که اجزای مبتنی بر بنتونیت یا گرافیت همراه با الکترود مس هستند به کاهش مقاومت خاک کمک می کند[۲۹]. 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[۳۰،۳۱]. فیوزهای با ظرفیت بالا (HRC) از اجزای سرامیکی ساخته شده‌اند که مورد استفاده قرار می گیرند[۳۲]. فیوزهای HRC بادوام هستند و می توانند جریان بالاتری را در شرایط خطا قطع کنند[۳۳].

۲-۸- جعبه اتصال آرایه

جعبه های اتصال آرایه ای برای اتصال پنل های PV به صورت سری و موازی استفاده می شوند. جعبه ها از مواد PVC ساخته 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[۳۱].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج طراحی بهینه فنی نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی متصل به شبکه

۳-۱-۱- نتایج تعداد پنل، اینورتر، استرینگ و آرایه ها

با توجه به اینکه مبنای طراحی بر اساس مقیاس و ظرفیت نیروگاه ۲۵ کیلو وات در نظر گرفته شده است 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

کیلو واتی رسید. دلیل این کار این است که اگر اینورتر یا پانلی از نیروگاه کارایی خود را از دست دهد یا نیاز به تعمیر داشته باشد قسمتی از نیروگاه بتواند به تولید انرژی خود ادامه دهد.
تعداد و نوع تجهیزات بهینه به صورت جداول (۳) و (۴) می باشد.

جدول ۳ : نوع و تعداد پنل مورد استفاده

تعداد	نام تجهیزات
۸×۵۰ = ۴۰۰ عدد	پنل 500w Mono Trina solar

جدول ۴ : نوع و تعداد اینورتر مورد استفاده

تعداد	نام تجهیزات
۸ عدد	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، پنل ها در هر قسمت به صورت ۵ ردیف که در هر ردیف ۱۰ عدد پنل سری می گردد که به پورت ورودی اینورتر متصل می شوند، یعنی در مجموع ۴۰ ردیف که در هر ردیف ۱۰ عدد پنل سری گردیده است.

۳-۱-۲- انتخاب سطح مقطع کابل

فضای نمونه ی در نظر گرفته شده بدین صورت می باشد که فاصله پنل ها تا اینوترها مجموعا ۸۰۰ متر سمت DC و از اینوتر تا کنتور مجموعا ۱۰۰ متر سمت AC در نظر گرفته می شود. نتایج محاسبات و طراحی کابل به صورت جدول (۵) می باشد.

۳-۲- نتایج شبیه سازی سیستم ۲۰۰ کیلووات خورشیدی فتوولتائیک متصل به شبکه توسط نرم افزار PVsyst

۳-۲-۱- مشخص کردن موقعیت جغرافیایی

در این قسمت مکان جغرافیایی برای نصب سیستم PV که تجزیه و تحلیل بر روی آن انجام می شود، انتخاب خواهد شد. 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 ی ماهواره ای توسط نرم افزار 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. شهر سنندج را به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد.موقعیت جغرافیایی نقطه مورد مطالعه برابر۳۵/۳۱N درجه و ۴۷/۹۹ E درجه بوده و ارتفاع آن ۱۴۹۷ متر از سطح دریا می باشد. متوسط انرژی تابشی سالیانه در سایت مورد مطالعه در حدود ۱۸۹۶/۶ کیلووات ساعت بر متر مربع می باشد. اطلاعات مربوط به انواع شدت تابش نور خورشید، دما از طریق سامانه سازمان هواشناسی ایران و نیز اطلاعات هواشناسی ناسا (موجود در دیتابیس نرم افزار PVSYST) حاصل شده و در محاسبات مربوطه مورد استفاده قرار گرفته است. جدول (۶) پارامترهای شهر سنندج را در طول یک سال نشان می دهد.

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 آلومنیوم	۰/۵۸۴۸۶۲۷۶۱	۲۵	۸۰۰	DC
جنس مس	۱/۷۴۴۱۴۰۶۲۵	۱۶	۱۰۰	AC
جنس آلومنیوم	۲/۷۹۰۰۳۹۰۶۳	۲۵	۱۰۰	AC

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

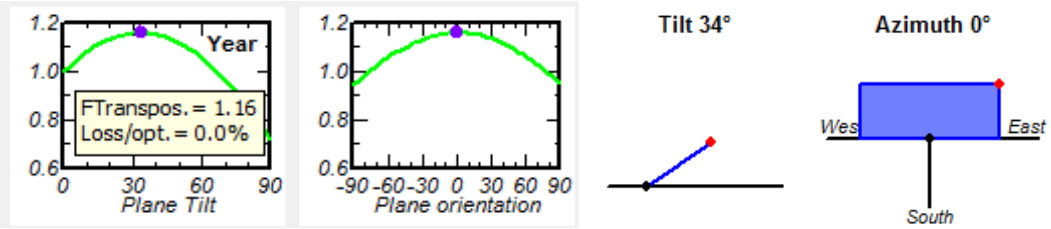
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	79.9	32.61	-0.32	123.7	119.8	20.66	20.07	0.882
February	97.2	40.79	2.98	133.0	128.8	21.77	21.17	0.865
March	146.3	51.39	8.53	178.5	172.5	27.98	27.21	0.829
April	179.3	57.66	12.63	188.3	181.5	28.99	28.13	0.812
May	217.5	65.49	17.99	206.2	198.0	31.19	30.24	0.797
June	236.4	60.02	24.12	213.1	204.5	31.65	30.72	0.783
July	237.5	62.42	28.41	218.7	210.1	32.05	31.13	0.773
August	217.3	56.36	27.58	220.8	213.1	32.25	31.33	0.771
September	183.1	42.81	21.56	215.8	209.1	31.75	30.89	0.778
October	133.3	40.97	15.30	180.5	175.1	28.06	27.33	0.823
November	93.8	32.31	7.42	145.4	140.9	23.52	22.90	0.856
December	75.3	27.26	2.77	125.8	121.9	20.81	20.23	0.874
Year	1896.9	570.09	14.15	2149.8	2075.4	330.69	321.35	0.812

Legends: GlobHor Horizontal global irradiation; GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings; DiffHor Horizontal diffuse irradiation; EArray Effective energy at the output of the array; T_Amb Ambient Temperature; E_Grid Energy injected into grid; GlobInc Global incident in coll. plane; PR Performance Ratio

۳-۲-۲- تعیین جهت و زاویه بهینه نصب صفحات خورشیدی

با توجه به شبیه سازی انجام شده، زاویه بهینه پنل ها در سایت مورد مطالعه ۳۴ درجه نسبت به سطح افق رو به جنوب و با آزیموت صفر 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 آن ها دریافت خواهد شد.

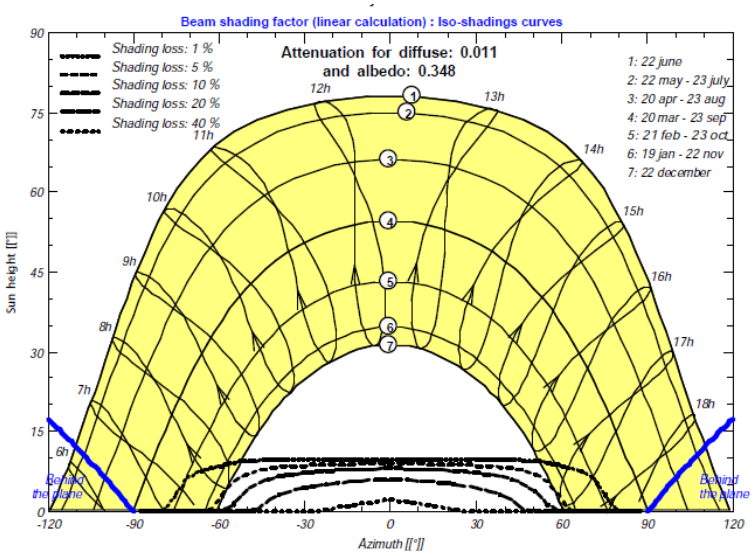


شکل ۲ : زاویه بهینه پنل در شهر سنندج تحلیل اثرات سایه اندازی (نرم افزار PVsyst)

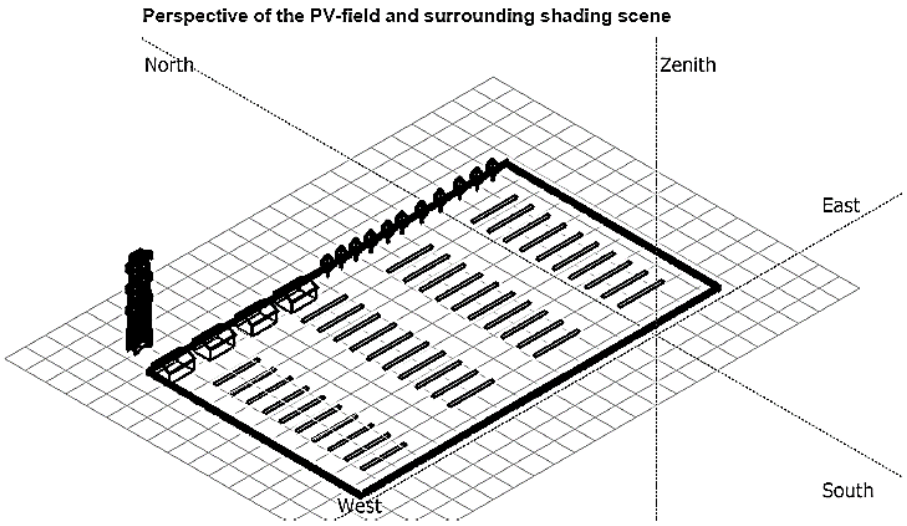
۳-۲-۳- تحلیل اثرات سایه اندازی

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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]



شکل ۳ : نمودار تلفات سایه اندازی (نرم افزار PVsyst)



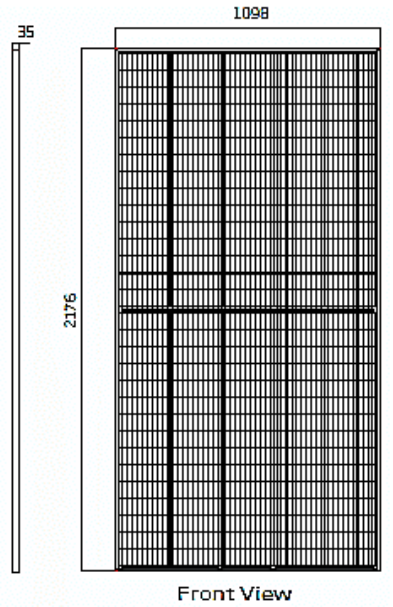
شکل ۴ : شماتیک شبیه سازی نیروگاه ۲۰۰ کیلوواتی فتوولتائیک متصل به شبکه توسط نرم افزار PVsyst

۳-۲-۴- انتخاب مدل پانل

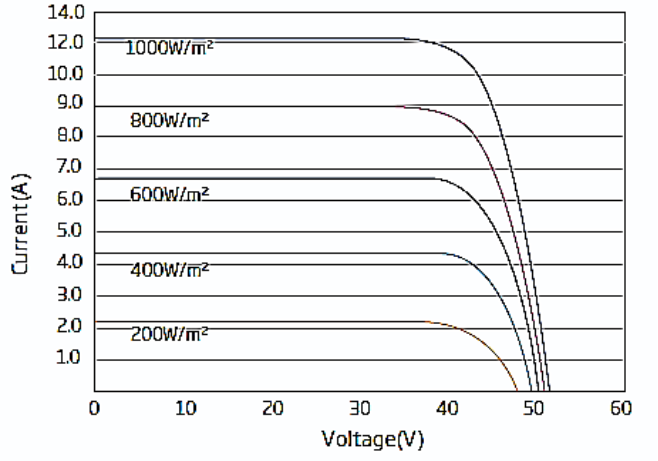
با توجه به انتخاب بهینه از بین سایر پنل های موجود در بازار ایران مدل پنل انتخاب شده با توان نامی ۵۰۰ واتی و شرکت سازنده آن Trina Solar می باشد. در شکل های (۵) و (۶) به ترتیب ابعاد پنل و منحنی مشخصه ولتاژ - جریان پنل انتخاب شده در شدت تابش های مختلف، برای این پنل خاص آورده شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]



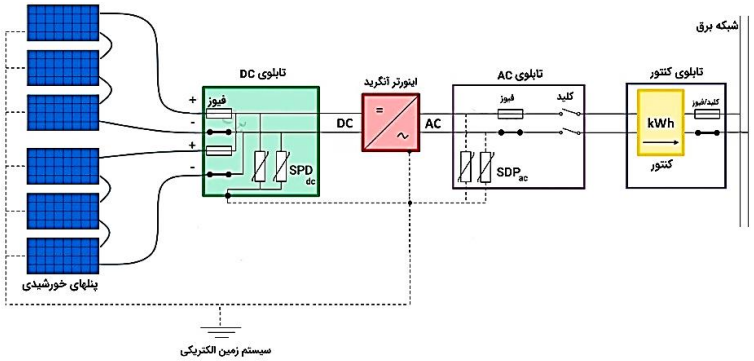
شکل ۵ : ابعاد پنل انتخاب شده برحسب میلیمتر



شکل ۶ : منحنی ولتاژ - جریان پنل انتخاب شده برحسب تغییرات تابش خورشید در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انتخاب اینورتر

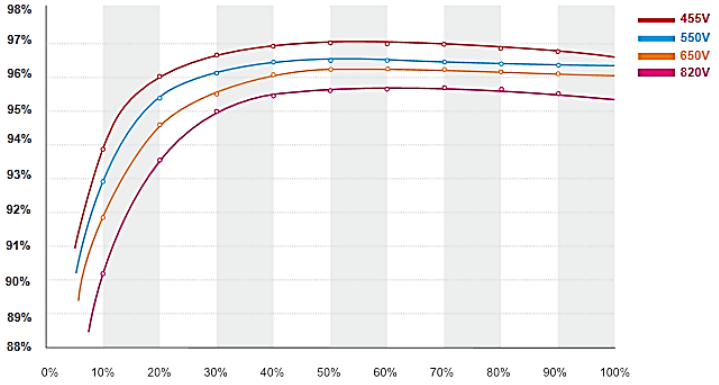
۳-۲-۵- انتخاب اینورتر

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 پنل ها و اینورتر و نمودار بازدهی اینورتر انتخاب شده را نشان می دهد.



شکل ۷ : مکان اجزای سیستم مورد مطالعه شامل پنل ها و اینورتر

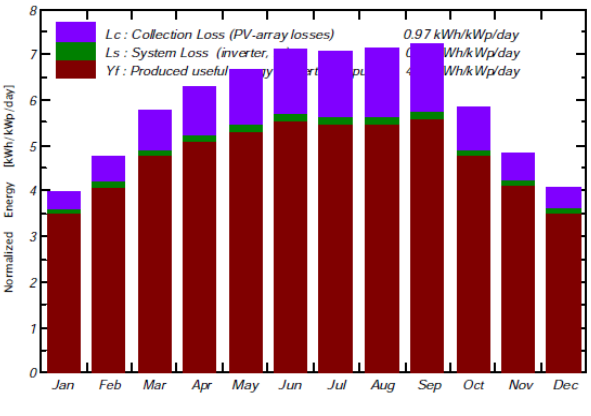
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]



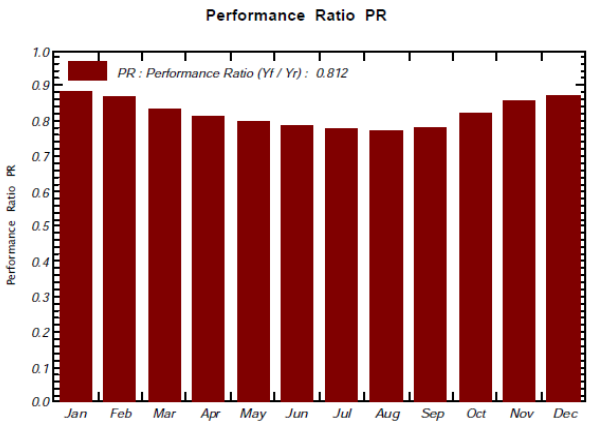
شکل ۸ : نمودار بازدهی اینورتر

۳-۲-۶- 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 ۲۵۰۰ مترمربع سایت مورد مطالعه برابر ۲۰۰ کیلو وات می باشد. در نیروگاه حاضر از پنل های ۵۰۰ واتی مونوکریستال به تعداد ۴۰۰ عدد استفاده شده است. نیروگاه از ۴۰ آرایه و که در هر ردیف ۱۰ پنل با هم دیگر سری گردیده است. مجموع آرایه ها توسط ۵ 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 ۳۲۱/۳ 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 ازاء انرژی مؤثر تولید شده در خروجی اینورتر محسوس تر است.



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

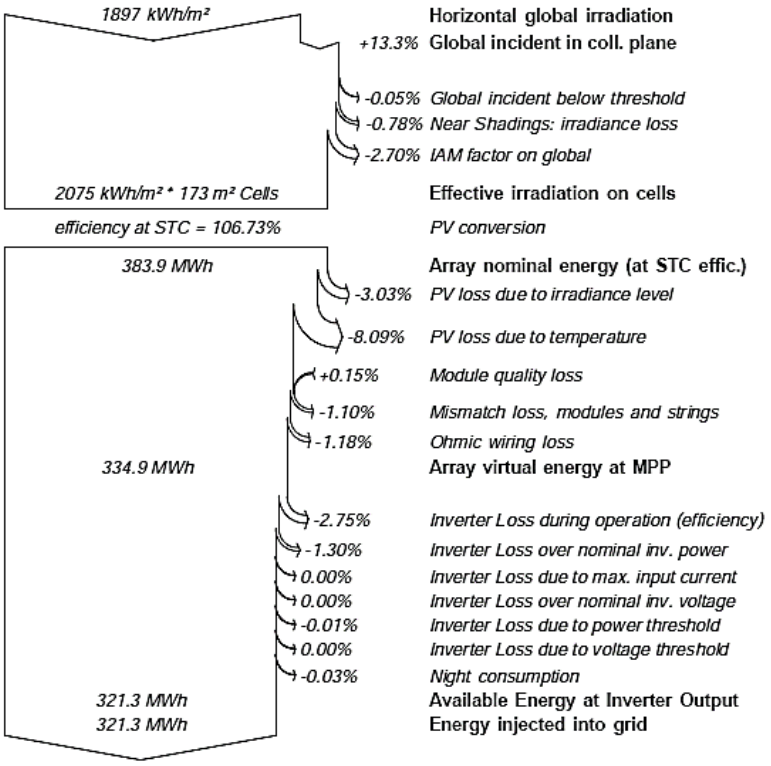


شکل ۱۰ : ضریب عملکرد نیروگاه در ماه های مختلف سال (نرم افزار PVsyst)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

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 ۸۷ درصد است. 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 پنل ها در شرایط استاندارد و درجه حرارت محیط می باشد. کل انرژی دریافتی از پنل ها در طول یک سال برابر ۳۲۱/۳ مگاوات ساعت می باشد.



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

۴- امکان سنجی اقتصادی

هدف اصلی تحلیل مالی در مطالعات امکان سنجی تعیین، تحلیل و تفسیر کلیه تبعات مالی یک سرمایه گذاری است که جهت تصمیم گیری سرمایه گذاران و تأمین کنندگان مالی می تواند مفید واقع شده و بر آن اساس میزان مطلوبیت طرح برای ذینفعان مشخص گردد. باید توجه داشت که به همان میزان که تکنولوژی های صنعتی گسترش می یابند، تصمیم گیری های اقتصادی برای ایجاد شرایط مطلوب تر مالی و اقتصادی نیز دشوارتر و حساس تر می گردند. از این رو مطالعات امکان سنجی با دقت در نکات مختلف سرمایه گذاری، شرایط را برای انتخاب مناسب تر هموار می سازد. این موضوع با توجه به جدید بودن حیطه تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر در کشور ایران از اهمیت بسزایی برای سرمایه گذاران برخوردار می باشد. بر اساس مفروضات ارائه شده ارزیابی مالی برای تولید برق از انرژی خورشیدی در شهر سنندج با استفاده از نرم افزار Retscreen انجام شده است.

خرید برق تولیدی از انرژی های تجدیدپذیر بصورت تضمینی توسط سازمان انرژی های نو ایران (ساتبا) صورت می پذیرد. (جدول (۷)) این خرید مطابق ماده ۶۲ قانون تنظیم بخشی از مقررات مالی دولت (مصوب در برنامه سوم و تنفیذ شده در برنامه چهارم توسعه اقتصادی اجتماعی کشور) برای خرید انرژی برق تولیدی نیروگاه های تجدیدپذیر صورت می پذیرد. با توجه به نرخ اعلام شده از طرف ساتبا، نرخ خرید برق تضمینی برای نیروگاه خورشیدی با ظرفیت ۲۰۰ کیلو وات، برابر با ۱۲۷۴۰ ریال بر کیلووات ساعت می باشد. با توجه به برآوردها و پیش فرض های شرح داده شده، مدل سازی طرح در نرم افزار Retscreen صورت پذیرفت که نتایج آن ارائه خواهد گردید.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

با توجه به نتایج بدست آمده نرخ بازده داخلی طرح حدود ۲۳ درصد می باشد. شکل (۱۵) خالص جریانات نقدی تجمعی در دوره بازگشت سرمایه را نشان می دهد.

هزینه تمام شده احداث کل نیروگاه خورشیدی در مقیاس ۲۰۰ کیلو وات (جدول (۸)) با در نظر گرفتن کل تجهیزات و وسایل مورد نیاز و زمین، استراکچر ، تقریبا حدود ۳۳۰۰۰۰۰۰۰۰۰ ریال می باشد. در شکل (۱۳) نتایج میزان درآمد سالیانه نیروگاه خورشیدی در مقیاس ۲۰۰ کیلو وات، نرخ خرید ساتبا و ضریب تعدیل برای شهر سنندج با توجه به ۲۰ سال دوره نیروگاه با توجه به تحلیل اقتصادی نرم افزار Retscreen آورده شده است.

جدول ۷ : تعرفه خرید تضمینی برق تولیدی از انرژی های تجدیدپذیر در سال ۱۴۰۰

ردیف	انواع نیروگاه ها		نرخ پایه خرید تضمینی برق (ریال بر کیلووات ساعت)
۱	زیست توده	لندفیل	۵۶۷۰
		سایر فرآیندهای زیستی (بیوشیمیایی) از جمله : هاضم بی هوازی	۷۳۵۰
		کلیه فرآیندهای حرارتی(ترموشیمیایی) از جمله : زباله سوزی، گازی سازی و پیرولیز	۷۷۷۰
۲	مزرعه بادی (با ظرفیت ده مگاوات و کمتر)		۸۹۱۸
۳	مزرعه خورشیدی (با ظرفیت ده مگاوات و کمتر)		۸۹۱۸
۴	زمین گرمایی(شامل حفاری و تجهیزات)		۵۲۷۸
۵	تولید برق از بازیافت تلفات حرارتی در فرآ دهای صنعتی		۶۹۱۶
۶	آبی کوچک (به ظرفیت ۱۰ مگاوات و کمتر)	بر روی رودخانه ها (رودخانه ای یا جریانی)	۵۹۱۵
		بر روی خطوط لوله انتقال آب و فاضلاب و تاسیسات جانبی سدها (پای سد و خطوط انتقال)	
۷	سامانه پیل های سوختی		۸۹۰۰۴
۸	توربین های انبساطی		۲۹۱۲
۹	بادی با ظرفیت یک مگاوات و کمتر		۱۰۳۷۴
۱۰	خورشیدی	با ظرفیت ۲۰۰ کیلووات و کمتر	۱۲۷۴۰
		با ظرفیت ۲۰ کیلووات و کمتر	۱۴۵۶۰

جدول ۸ : هزینه تجهیزات نیروگاه خورشیدی متصل به شبکه با ظرفیت ۲۰۰ کیلو وات

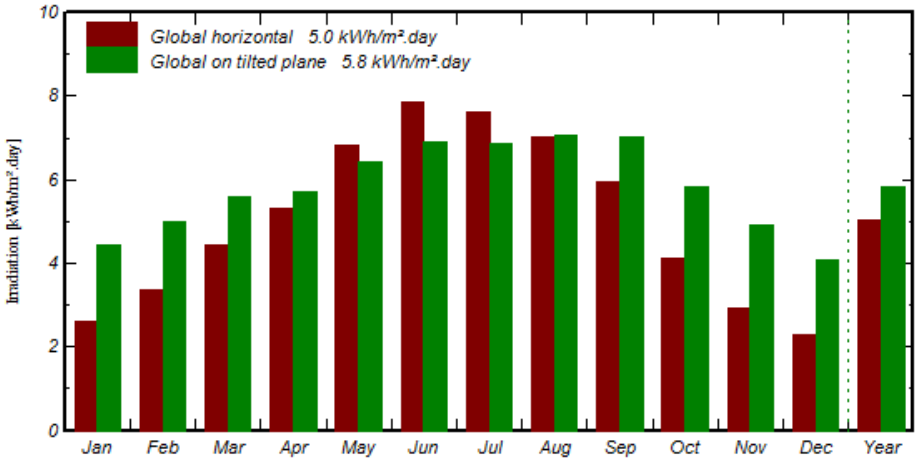
ردیف	تجهیزات	تعداد	قیمت واحد	قیمت کل (ریال)
۱	اینورتر ۲۵ کیلووات Growattt	۴	۱،۲۸۷،۵۰۰،۰۰۰	۵،۱۵۰،۰۰۰،۰۰۰
۲	پنل ۵۰۰وات مونوکریستال _ Trina solar	۴۰۰	۳۵،۳۸۹،۷۷۰	۱۸،۱۱۹،۵۶۲،۲۴۰
۳	سازه نیروگاهی	۱۰۰	۲۰،۶۰۰،۰۰۰	۲،۰۶۰،۰۰۰،۰۰۰
۴	چاه ارت	۲	۳۰،۰۰۰،۰۰۰	۶۰،۰۰۰،۰۰۰
۵	تابلو برق ac. dc	۱	۳۰۹،۰۰۰،۰۰۰	۳۰۹،۰۰۰،۰۰۰
۶	تجهیزات الکتریکی	۱	۱،۲۳۶،۰۰۰،۰۰۰	۱،۲۳۶،۰۰۰،۰۰۰
۷	هزینه نصب	۱	۱،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰	۱،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰
	جمع فاکتور	**۶۲۱**		**۲۷،۹۳۴،۵۶۲،۲۴۰**

باتوجه به نتایج بدست آمده و قیمت تمام شده نیروگاه و مدت زمان دوره بازگشت سرمایه (۴ الی ۵ سال)، احداث چنین نیروگاهی در این مقیاس از لحاظ اقتصادی قابل توجیه و مقرون به صرفه می باشد. همچنین در صورت اخذ وام بانکی، مدت زمان بازگشت سرمایه این طرح با وامی در سطح نرخ سود ۱۵ درصد در طی ۵ سال خواهد بود که این امر از لحاظ اقتصادی قابل توجیه و مقرون به صرفه می باشد. سود خالص ۲۰ ساله نیروگاه، که از باقیمانده اختلاف قیمت درآمد تجمیعی ۲۰ ساله نیروگاه و قیمت تمام شده احداث کل نیروگاه بدست می آید، تقریبا حدود ۲۷۹۴۸۸۴۷۵۶۵۶/۰۲ ریال می باشد. همچنین نتایج درصد کاهش انتشار آلاینده ها که برای محیط زیست مضر می باشند به صورت شکل (۱۴) می باشند. این میزان tCO_2 ۲۰۸/۵

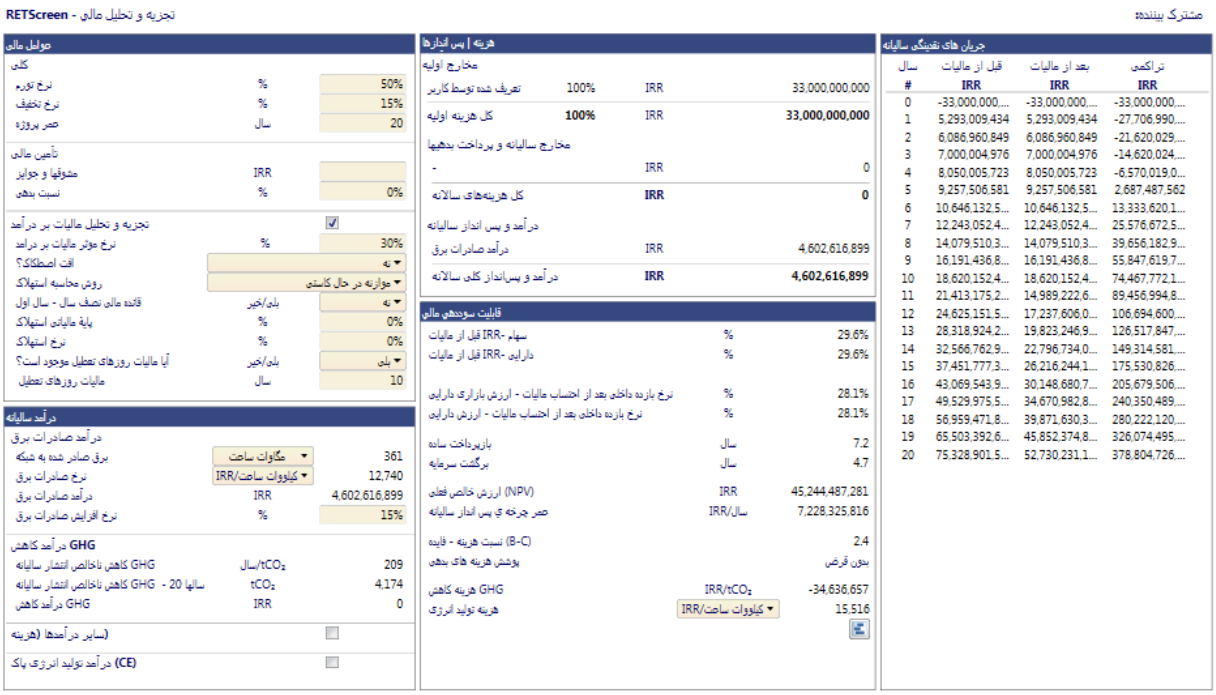
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

می باشد، که این عبارت بدین معناست که در طول عمر ۲۰ ساله نیروگاه کاهش ۲۰۸/۵ تن دی اکسید کربن را داریم که این مقدار معادل حذف یا کار نکردن ۳۸/۲ عدد کامیون یا ماشین می باشد.

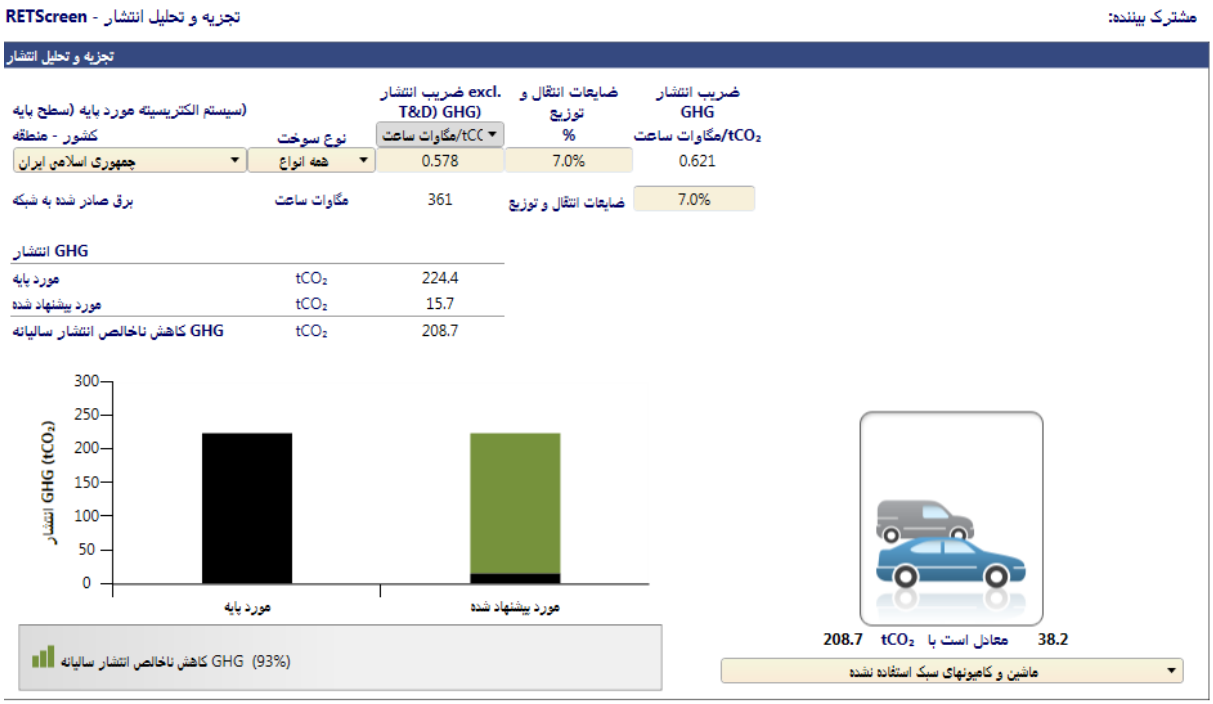


شکل ۱۲ : میزان انرژی تابش کلی سالانه برای شهر سنندج توسط نرم افزار PVsyst

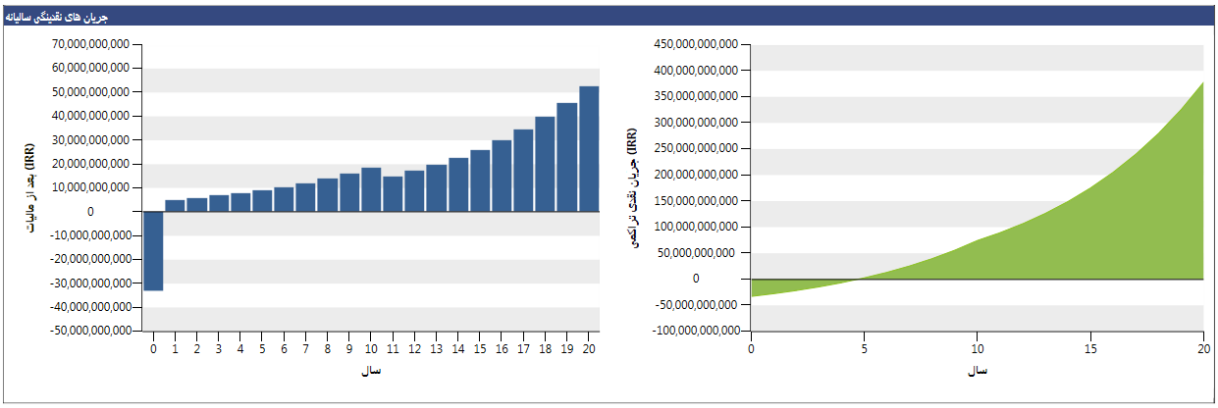


شکل ۱۳ : نتایج میزان درآمد سالیانه نیروگاه خورشیدی در مقیاس ۲۰۰ کیلو وات شهر سنندج توسط نرم افزار Retscreen

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]



شکل ۱۴ : نتایج تجزیه و تحلیل درصد کاهش انتشار آلاینده های مضر برای محیط زیست شهر سنندج توسط Retscreen



شکل ۱۵ : خالص جریانات نقدی تجمعی در دوره بازگشت سرمایه شهر سنندج

۵- نتیجه گیری

با توجه به اینکه هزینه اولیه احداث نیروگاه‌های خورشیدی بالا می‌باشد، طراحی بهینه اجزای اصلی نیروگاه و برآوردهای اقتصادی آن به منظور بازگشت سرمایه سریعتر امری بسیار ضروری می‌باشد. علی‌رغم اینکه مقالات بسیاری به بررسی نیروگاه خورشیدی و شبیه‌سازی و محاسبه توان خروجی آن پرداخته‌اند ولی طراحی بهینه و مطالعات اقتصادی به طور همزمان برای احداث یک نیروگاه مورد نظر نبوده است.

بدین منظور در این پژوهش به طراحی فنی بهینه و تحلیل اقتصادی به طور همزمان در شهر سنندج پرداخته شد.

در این مطالعه طراحی بهینه احداث نیروگاه خورشیدی فوتوولتاییک متصل به شبکه در شهر سنندج با در نظر گرفتن قیود حاکم بر اجزای نیروگاه نظیر ولتاژ و توان خروجی پنل، محدوده ولتاژ و جریان ورودی اینورتر بررسی شد. با انتخاب پنل مناسب و چیدمان بهینه این پنل ها در منطقه احداث نیروگاه با کمترین مساحت ممکن، نوع اینورترها انتخاب و مطالعات امکان سنجی آن در نرم افزار PVsyst انجام شد. مطابق نتایج بدست آمده، پنل های ۵۰۰ واتی مونو کریستال به تعداد ۴۰۰ عدد در ۴۰ ردیف که در هر ردیف ۱۰ پنل به صورت سری بسته خواهد شد. همچنین زاویه بهینه پنل ها در نقطه مورد مطالعه ۳۴ درجه نسبت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

به سطح افق رو به جنوب و با آزیموت ۰ درجه در جهت دستیابی به بیشینه توان بدست آمد. به منظور کاهش سایه افکنی پنل ها بر روی هم فاصله بهینه پنل ها ۸ متر محاسبه شد. با توجه به موارد فوق، انرژی قابل تزریق به شبکه برق در طول یک سال و با در نظرگیری شرایط تابش خورشید و دما در منطقه مورد نظر و همچنین تجهیزات در نظر گرفته شده و راندمان مربوطه به آنها و تلفات کل سامانه، در حدود ۳۲۱/۳ مگاوات ساعت در سال محاسبه شد.

همچنین با احداث این مقیاس نیروگاه خورشیدی سالیانه ۲۰۸/۷ tco_2 کاهش انتشار کربن خواهیم داشت. در قسمت بعدی این پژوهش مطالعات امکان سنجی اقتصادی برای پروژه مذکور انجام گردید که با توجه به نتایج بدست آمده نرخ بازده داخلی طرح حدود ۲۳ درصد بدست آمد و بازگشت سرمایه حدودا کمتر از ۵ سال شد که این از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود. حتی برای اخذ وام تا سطح ۱۵ درصد، در طی ۵ سال بازگشت سرمایه رخ خواهد داد که این خود از نظر اقتصادی قابل توجیه می باشد.

به طور کلی از آنجایی که کشور ایران پتاسیل های بالایی در تولید انرژی های تجدیدپذیر به خصوص انرژی خورشیدی دارد، استفاده هرچه بهتر از این نعمت های خدادادی و کاهش استفاده از سوخت های فسیلی می تواند باعث پیشرفت این مرز و بوم شود. فلذا در این راستا حمایت های دولتی از بخش خصوصی در خصوص سرمایه گذاری در حوزه انرژی های تجدیدپذیر، می تواند راهگشا باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

فهرست علائم

علائم انگلیسی	
ضریب تصحیح حرارتی	F
شدت جریان جاری در کابل، A	I
جریان مصرف، A	$\boldsymbol{I_n}$
جریان اتصال کوتاه پنل، A	$\boldsymbol{I_{sc}}$
ضریب مجاورت	K
طول کابل، m	L
تعداد حداکثر پنل مجاز که سری بسته می شوند	N_{max}
تعداد حداقل پنل مجاز که سری بسته می شوند	N_{min}
توان اینورتر، w	P
سطح مقطع کابل، mm^2	S
دمای محیط، ℃	T
افت ولتاژ هادی	$\Delta \boldsymbol{u}\%$
ولتاژ، v	V
ماکزیمم ولتاژ اینورتر، v	V_{max}
مینیمم ولتاژ اینورتر، v	V_{min}
ولتاژ پانل، v	V_{mp}
ولتاژ مدار باز پانل، v	V_{oc}
علائم یونانی	
زاویه فاز	$\emptyset$

مراجع

[1] Safari, Mekhilef (2011) , Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT With
Direct Control Method Using Cuk Converter,IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS,VOL.
58, NO. 4, APRIL.

[2] U.S. DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. 20% wind energy by 2030. http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/ pdfs/41869.pdf. Accessed 3/10/09.

[3] شمس، محمد حسین، کیا ،محسن ، مهدوی ، بهداد، ۱۳۹۲، مطالعات طراحی یک نیروگاه فوتوولتائیک 100 کیلوواتی متصل به شبکه در تهران با استفاده از نرم افزار PVsyst ، نشریه انرژی ایران، دوره 16 ، شماره2

[4] Ishaque, Salam, Shamsudin (2011) , Application of Particle Swarm Optimization for Maximum Power Point Tracking of PV System with Direct Control Method, 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1214 – 1219.

[5] Barra, Conti, Santamata, Scarmozzino, and Visentin, (1977), Shadow Effect in Large Solar Collectors in Large Scale Solar Power Plants, Sol. Energy, 19, pp. 759–762.

[6] حقبین، مجیب، قیانی ، محسن، ۱۳۹۴، بررسی هارمونیکی یک نیروگاه 100 کیلوواتی متصل به شبکه، هفتمین کنفرانس ملی مهندسی برق و الکترونیکو دانشگاه آزاد گناباد.

[7] عباس پور ، مجید ، طاهری، ترانه ، ۱۳۹۰، ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی نیروگاههای خورشیدی با کمک نرم افزار RETScreen با توجه به قانون هدفمندی یارانه ها مجله انسان و محیط زیست شماره ۱۸.

[8] 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.

[9] Zhang, Weiping, et al. 2019"Sizing a stand-alone solar wind-hydrogen energy system using weather forecasting and a hybrid search optimization algorithm." *Energy conversion and management* 180: 609-621. http://www.satba.gov.ir/

[10] Rehman, Shafiqur, et al. 2017 "Feasibility study of the grid connected 10 MW installed capacity PV power plants in Saudi Arabia." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80: 319-329. Renewables 2015 Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for 21st Century.

[11] Islam, Md Shahinur. 2018"A techno-economic feasibility analysis of hybrid renewable energy supply options for a grid-connected large office building in southeastern part of France. " *Sustainable cities and society* 38: 492- 508

[12] Emmanuel, Michael, Daniel Akinyele, and Ramesh Rayudu. 2017 "Techno-economic analysis of a 10 kWp utility interactive photovoltaic system at Maungaraki school, Wellington, New Zealand." *Energy* 120: 573- 583.

[13] Bartos, Matthew D., and Mikhail V. Chester. 2015 "Impacts of climate change on electric power supply in the Western United States." *Nature Climate Change* 5.8: 748 752.

[14] Chander, Subhash, et al. 2015 "A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature." *Energy Reports* 1: 104-109.

[15] Sharma, Shruti, Kamlesh Kumar Jain, and Ashutosh Sharma. 2015 "Solar cells: in research and applications—a review." *Materials Sciences and Applications* 6.12: 1145.

[16] Dubey, Swapnil, Jatin Narotam Sarvaiya, and Bharath Seshadri. 2013 "Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world–a review." *Energy Procedia* 33: 311-321.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

[17] 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.

[18] PVsyst User Manual. <URL: http://files.pvsyst.com/help/>

[19] Y.M. Irwana, A.R. Ameliaa, M. Irwantoa, F. Ma, W.Z. Leowa, N. Gomesha, I. Safwati, Stand-alone photovoltaic (SAPV) system assessment using PVSYST software, Energy Procedia 79 (2015) 596–603.

[20] 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.

[21] 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.

[22] S. Amstrong, M.E. Glavin and W.G. Hurley, Comparison battery charging algorithms for stand-alone photovoltaic system. 2008 IEEE.

[23] Vikrant Sharma, S.S. Chandel. Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. Energy 2013; 55: 476-485.

[24] B. Shiva Kumar, K. Sudhakar. Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India. Energy Reports 2015; 1: 184-192.

[25] Ayompe LM, Duffy A, Mc Cormack SJ, Conlon M. Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland. Energy Conversion and Management 2011; 52: 816-825.

[26] S. Eyigun, O. Guler, Turkey solar potential and viability of solar photovoltaic power plant in Central Anatolia, Int. Renewable Energy Congr. (2010) 94–99.

[27] 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.

[28] Srisavitr solar, 2014. Mono crystalline photovoltaic modules. 250Wp datasheet.

[29] IEEE, 2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Std. 80 2000(Revision of IEEE Std 80-1986).

[30] Mersen, 2015. Surge-trap pluggable STPT2 series - 40kA PV. DS-STPT2-40KPV- 06-0518-EN datasheet.

[31] CITEL, 2014. 3-phase type 2 surge protector. DS440 series datasheet.

[32] Littlefuse, 2018. SPF series solar fuses. Power-Gard fuse dtasheet, Rev:4-I- 071118.

[33] 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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]

چکیده انگلیسی:

Optimal Design and Economic Feasibility Study of a Grid-Connected Photovoltaic System Solar Power Plant with a Capacity of 200 kw in the City of Sanandaj, Iran

Pedram Ahadi[1], Farbod Fakhrabadi [2]*, Alireza Pourshaghaghi [3], Farshad Kowsari [4]

[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.

Received: July 2022, Accepted: December 2022

Abstract

It is impossible to develop the application of solar energy over the country and, particularly, to develop the establishment of solar power stations without solar radiation potentiometry, accurate identification of regions with appropriate radiation, or extraction of credible data that can specify the amount and distribution of this energy. This paper investigated the optimal design and feasibility of establishing a two-hundred-kilowatt power station in the city of Sanandaj, Iran considering the relevant economic examinations. In this paper, the PVsyst software was used for calculation of received solar energy and optimal design of the power station, and RETScreen was used for examination of the economic feasibility. For this purpose, the photovoltaic array layout was designed and optimized to prevent shadows cast by modules and occupy the smallest possible area given the geographic location of the site in Sanandaj where the power station was to be established. This would mitigate system costs and raise the productivity of the power station using the available solar potentials. Next, the output curve, involving annual energy production, loss, and cast shadow, were extracted, analyzed, and used as an input to the economic feasibility study. The results also demonstrated that the return of capital exhibited a favorable rate given the high capacity of energy production in the area under investigation.

Key words: Grid-Connected Photovoltaic Solar Power Plant, Optimal Design, Economic Feasibility Study, PVsyst, RETScreen.

*corresponding author: Farbod.Fakhrabadi@iau.ac.ir

Cite this article as: Pedram Ahadi, Farbod Fakhrabadi, Alireza Pourshaghaghi, Farshad Kowsari, Optimal Design and Economic Feasibility Study of a Grid-Connected Photovoltaic System Solar Power Plant with a Capacity of 200 kw in the City of Sanandaj, Iran. Journal of Energy Conversion, 2023, 9(5), 85-104.
DOR**:** **20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.5.4]