



## طراحی تا اجرای پارکینگ خورشیدی متصل به شبکه (مطالعه موردی در شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان شرقی)

سعید خانی<sup>1</sup>، لیلا محمدیان<sup>2\*</sup>

1- مهندس برق، شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان شرقی، تبریز، ایران  
2- استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران  
[Le.mohammadian@iaue.ac.ir](mailto:Le.mohammadian@iaue.ac.ir) \*

### چکیده

ایران پتانسیل بالایی در بهره‌گیری از انرژی خورشیدی از طریق احداث پارکینگ‌های خورشیدی دارد. هزینه اولیه احداث چنین پارکینگ‌هایی بالا بوده و نیازمند طراحی و اجرای بهینه است. در این پژوهش، طراحی و اجرای بهینه یک پارکینگ خورشیدی متصل به شبکه در محوطه ستاد شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان شرقی با شرایط مشخص (سقف پارکینگ موجود) انجام شده است. هدف اصلی، دستیابی به بیشترین توان ممکن با بهره‌وری بالا است. بدین منظور، ابتدا شیب و جهت‌گیری مناسب پنل‌ها با استفاده از نرم‌افزار PVSyst به صورت ۳۰ درجه تعیین شد. موقعیت جغرافیایی محل، اندازه پارکینگ موجود، نوع و اندازه پنل‌های خریداری‌شده، رعایت فاصله مناسب میان پنل‌ها جهت تسهیل تعمیر و نگهداری و جلوگیری از سایه‌اندازی، استفاده حداکثری از سطح موجود، زیبایی ظاهری و بهینه‌سازی تولید برق سالانه از عوامل تعیین‌کننده بودند. پس از تعیین تعداد پنل‌ها، چیدمان و فاصله بهینه آن‌ها پیشنهاد شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، امکان نصب ۲۵۲ پنل ۲۰۰ واتی در این پارکینگ وجود دارد. این تعداد پنل ظرفیت پارکینگ را به ۵۰٫۴ کیلووات پیک می‌رساند و میزان برق تولیدی سالانه آن حدود ۸۰ مگاوات‌ساعت برآورد شده است. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار SMA Sunny Design، تعداد و ظرفیت بهینه اینورترها تعیین شده و سازگاری آن‌ها با پنل‌ها و آرایه‌های متصل بررسی گردید. بر اساس محاسبات اقتصادی، دوره بازگشت سرمایه کمتر از پنج سال برآورد شده و لذا این طرح توجیه اقتصادی دارد. **کلیدواژه‌گان:** آرایه فتولتاییک، اینورتر، پارکینگ خورشیدی، نیروگاه متصل به شبکه.

## Design to implementation of a grid-connected solar parking lot (Case study in East Azarbaijan Electric Power Distribution Company)

Saeid Khani<sup>1</sup>, Leila Mohammadian<sup>2\*</sup>

1- East Azarbaijan Electric Power Distribution Company, Tabriz, Iran  
2- Department of Electrical Engineering, Shab.C., Islamic Azad University, Shabestar, Iran  
[Le.mohammadian@iaue.ac.ir](mailto:Le.mohammadian@iaue.ac.ir)

Received: 11 May 2024 Accepted: 12 March 2025

### Abstract

Iran has significant potential to harness solar energy through solar parking lots. While initial construction costs are high, optimal design and implementation can maximize efficiency and feasibility. A grid-connected solar parking lot at the East Azerbaijan Electricity Distribution Company headquarters to enhance power generation within the constraints of the existing parking lot ceiling is designed and implemented in this study. Using PVSyst software, the optimal tilt and orientation of the panels were determined as 30 degrees, considering factors such as geographical location, parking area dimensions, panel type and spacing for maintenance, shadow prevention, surface utilization, aesthetics, and annual energy output maximization. Simulation results show that 252 panels (200 watts each) can be installed, achieving a peak capacity of 50.4 kilowatts and generating approximately 80 megawatt-hours annually. The proposed layout ensures optimal spacing and arrangement of panels. Additionally, SMA Sunny Design software was used to determine the optimal number and capacity of inverters, ensuring compatibility with the connected arrays. Economic analysis reveals a payback period of under five years, proving the project's viability.

**Keywords:** Photovoltaic array, inverter, solar parking, grid-connected power plant.

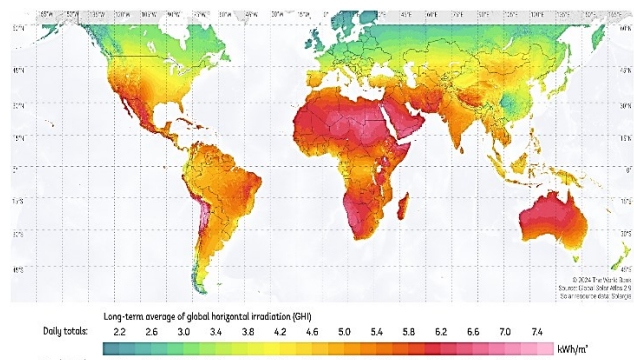
## 1- مقدمه

ساختمان وجود ندارد، می‌تواند با بهبود عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی، ارزش‌آفرینی پارکینگ‌های معمولی را افزایش دهد [10]. این ارزش‌افزوده ناشی از تولید انرژی تجدیدپذیر، وجود پارکینگ سرپوشیده، امکان شارژ وسایل نقلیه الکتریکی، امکان اتصال به شبکه یا استفاده مستقیم از انرژی تولیدی و بهره‌گیری از سیستم‌های ذخیره انرژی برای نگهداری انرژی تولیدشده در محل است. در یک پارکینگ خورشیدی استاندارد، معمولاً برای هر جایگاه پارک مساحت ۱۲ تا ۱۵ مترمربع در نظر گرفته می‌شود. هزینه‌ها بسته به نوع پارکینگ، مقیاس، طراحی و چیدمان متفاوت است [11].

اوهو و همکاران در سال ۲۰۲۲ در کشور نیجریه، با استفاده از نرم‌افزار PVsyst، یک نیروگاه خورشیدی ۵۰۰ کیلوواتی طراحی کردند. در این نیروگاه، شب بهینه ماژول‌ها ۵۰ درجه تعیین شد و مجموعاً ۱۹۶۲ پنل خورشیدی (شامل ۱۸ سری و ۱۰۹ ماژول) مورد استفاده قرار گرفت. توان خروجی این نیروگاه، با احتساب تلفات، ۱۱۱۴۰۵ مگاوات‌ساعت در سال برآورد شده است. این میزان توان، علاوه بر تأمین برق موردنیاز مصرفی، امکان فروش مازاد تولید به شبکه برق را نیز فراهم می‌کند [۱۲]. آکنیل و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی کارکرد و طول عمر قطعات نیروگاه خورشیدی ۱ مگاواتی متصل به شبکه در نیجریه پرداختند [۱۳]. شعبان و پتینیر در سال ۲۰۱۴ منابع انرژی تجدیدپذیر را به عنوان جایگزینی مقرون‌به‌صرفه برای تولید انرژی، خصوصاً در تأمین انرژی مناطق دوردست، مناسب دانسته‌اند [۱۴]. همچنین چانگ کاکاتی و همکاران در سال ۲۰۲۰ عملکرد یک نیروگاه خورشیدی ۱ مگاواتی متصل به شبکه را با استفاده از نرم‌افزار PVsyst بررسی کرده‌اند [15]. نتایج کلی نشان می‌دهند که منابع انرژی تجدیدپذیر، از جمله باد، جزر و مد، آب در حال ریزش، زیست‌توده و انرژی زمین‌گرمایی، منابعی پایان‌ناپذیر، دسترس‌پذیر و بدون آلاینده هستند [۱۶-۱۷]. بریمو و همکاران در سال ۲۰۱۳ دو نوع سیستم خورشیدی و هیبریدی را برای تأمین الکتریکی مناطق دوردست به صورت مقایسه‌ای بررسی کرده‌اند [18]. احمد و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک نیروگاه فتوولتائیک ۲۵۰ کیلوواتی را با استفاده از نرم‌افزار PVsyst طراحی کردند. این نیروگاه شامل ۱۴۲۸ ماژول خورشیدی ۱۷۵ وات و ۱۰ اینورتر ۲۵ کیلووات بوده و برای مساحت ۱۸۵۸ مترمربع به منظور تأمین توان مورد نیاز طراحی شده است [۱۹]. عمر و همکاران نیز در سال ۲۰۱۹ به همین شیوه در پاکستان یک پارکینگ خورشیدی برای یک آزمایشگاه طراحی کردند که در آن زاویه پنل‌ها ۱۰ درجه لحاظ شده است. طبق مدل اینورتر و ماژول‌های انتخابی، دوره بازگشت سرمایه ۶ سال تخمین زده شده است [20].

ایرینگوا و کوواچیک در سال ۲۰۲۱ یک مطالعه موردی در اروپا برای پارکینگ خورشیدی خانگی انجام داده‌اند. نتایج نشان داده است که علیرغم پتانسیل تابشی پایین منطقه، این پروژه صرفه اقتصادی دارد و قابل توجیه است [۲۱]. سینگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ شبیه‌سازی پارکینگ خورشیدی را با استفاده از نرم‌افزار PVsyst در هند انجام داده‌اند که نشان می‌دهد به دلیل پتانسیل تابشی بالای منطقه، راندمان پارکینگ برای شارژ ۴۱۴ خودروی الکتریکی و کاهش سالانه ۷۹۵۰ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن مناسب است [22]. علاوه بر این، مطالعات متعددی جهت شبیه‌سازی پارکینگ‌های خورشیدی از جنبه‌های امکان‌سنجی، افزایش بازده، کاهش تلفات و تأثیرات زیست‌محیطی انجام شده است. نمونه‌های برجسته شامل

انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی رایگان، پاک و عاری از اثرات مخرب زیست‌محیطی است که از دیرباز به روش‌های گوناگون توسط بشر مورد استفاده قرار گرفته است. بحران انرژی در سال‌های اخیر حساسیت کشورهای جهان را نسبت به مسائل مربوط به انرژی افزایش داده است. جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر، به ویژه انرژی خورشیدی به کنترل عرضه و تقاضای انرژی، و کاهش انتشار گازهای آلاینده کمک می‌کند. مطابق شکل ۱، نقشه میانگین تابش سالانه نور خورشید به کره زمین نشان می‌دهد که ایران در کمربند خورشیدی زمین قرار گرفته و پتانسیل بالایی برای دریافت انرژی خورشیدی دارد. متوسط تابش خورشید در ایران حدود ۱۹۰۲۳ مگاژول بر مترمربع است. همچنین میزان تابش خورشید از ۲۰۸ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در مناطق جنوب شرقی تا ۵۰۴ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در مناطق مرکزی متغیر است [1].



شکل 1 نقشه میانگین تابش سالانه تابش نور خورشید به کره زمین [1]

مقالات بسیاری به طراحی نیروگاه خورشیدی، شبیه‌سازی و محاسبه توان خروجی آن پرداخته‌اند. گونرهان و هپاسلی در سال ۲۰۰۷ استفاده از برق خورشیدی در ساختمان‌های اداری با توجه به سیاست‌های انرژی دولت را مورد بررسی قرار داده‌اند [۲]. نصری و لگر در سال ۲۰۱۰ استفاده از نیروگاه خورشیدی در یک منطقه دوردست را بررسی کرده‌اند [۳]. افروزی و همکاران در سال ۲۰۱۱ به شبیه‌سازی بهینه مزرعه خورشیدی با استفاده از جعبه‌ابزار بهینه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB پرداخته‌اند [۴]. برا و همکاران در سال ۱۹۷۷ مدلی برای نیروگاه خورشیدی با در نظر گرفتن اثر سایه در نیروگاه‌های خورشیدی مقیاس بزرگ پیشنهاد کرده‌اند [۵]. ناینگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ به تخمین ظرفیت تولید توان خورشیدی به روش شبکه عصبی پرداخته‌اند [6]. با توجه به اهمیت پنل و اینورتر در یک نیروگاه فتوولتائیک متصل به شبکه، افروزی و همکاران در سال ۲۰۱۱ به انتخاب ابعاد اجزای نیروگاه فتوولتائیک از طریق الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند [۷]. ملیت و همکاران در سال ۲۰۰۴ ظرفیت تجهیزات یک نیروگاه خورشیدی مستقل از شبکه را با روش شبکه‌های عصبی بهینه کرده‌اند [۸]. بسیاری از مقالات، مانند هانگ بین و ژیاوتونگ در سال ۲۰۰۹، به افزایش بهره‌وری نیروگاه فتوولتائیک از طریق بهبود الگوریتم ردیابی نقطه توان بیشینه پرداخته‌اند [9]. نصب سیستم‌های فتوولتائیک در پارکینگ‌ها، در مکان‌هایی که محل پارک خودرو برای نصب سامانه فتوولتائیک مناسب است یا امکان نصب در

ممکن با کمترین تلفات و هزینه است. تأمین بودجه نیز با توجه به شرایط فعلی پارکینگ، پنل‌ها و اینورترهای پیشنهاد شده توسط تأمین‌کننده، و در چارچوب زاویه شیب و جهت‌گیری بهینه پنل‌ها مد نظر قرار گرفته است.

## 2-2-1- پارامترهای ورودی طراحی

سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه شامل مجموعه‌ای متشکل از آرایه‌های فتوولتاییک، اینورتر و تجهیزات ارتباط با شبکه تعریف شده است. قانون اول در این سیستم آن است که همه رشته پنل‌های متصل به ورودی اینورتر یا ورودی دنبال‌کننده نقطه بیشینه توان باید همگن باشند. همگن بودن رشته‌های پنل به معنای وجود پنل‌های یکسان در رشته‌ها، برابر بودن تعداد پنل‌های رشته‌ها و نیز پلاریته یکسان پنل‌ها است [28].

## 2-2-2- مدل پنل

در انتخاب توان پنل‌ها باید به عواملی مانند کاهش هزینه به ازای هر وات، کاهش مساحت اشغال‌شده، سهولت تعمیر و نگهداری، ساده‌تر شدن فرآیند عیب‌یابی، کاهش تعداد اتصالات و همچنین کاهش وزن پنل‌ها توجه داشت. بر این اساس، پنل‌هایی با توان بالاتر در طراحی نیروگاه‌ها ترجیح داده می‌شوند. پنل‌های تأمین‌شده برای نیروگاه حاضر، پنل‌های ۲۰۰ واتی از یک برند چینی با مدل YL200P-35b هستند که مشخصات الکتریکی و فیزیکی آن‌ها در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱ مشخصات پنل YL200P-35b در شرایط استاندارد

نوع ماژول	مولتی کریستال
توان در نقطه بیشینه	200 وات
بازده	15/4 %
ولتاژ در نقطه بیشینه	36/7 ولت
جریان در نقطه بیشینه	5/43 آمپر
ولتاژ مدار باز	46/5 ولت
جریان اتصال کوتاه	5/82 آمپر
طول	1310 میلی‌متر
عرض	990 میلی‌متر

## 2-2-3- تعیین زاویه و آرایش بهینه پنل‌ها بر سقف پارکینگ

فاکتورهای مهم در نحوه چیدمان پنل‌های خورشیدی، جهت‌گیری پنل‌ها، زاویه نصب و فاصله بین ردیف‌ها هستند. در شرایط بدون سایه، حداکثر انرژی سالانه زمانی به دست می‌آید که پنل‌ها رو به جنوب بوده و زاویه نصب آن‌ها کمی کمتر از عرض جغرافیایی محل باشد. فاصله بین ردیف‌ها نیز باید طوری تنظیم شود که آرایه‌ها حداقل شش ساعت در میانه روز بدون سایه باشند. البته این شرایط همیشه عملی نیست و باید میان کاهش سایه و الزامات محل و اهداف نصب آرایه‌ها تعادل برقرار شود [27]. با ورود اطلاعات جغرافیایی و هواشناسی شهر تبریز در نرم‌افزار PVsyst، همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، زاویه بهینه نصب پنل‌ها برای استحصال حداکثر انرژی سالانه حدود ۳۵ درجه با جهت‌گیری به سمت جنوب تعیین شده است.

کمترین فاصله مورد نیاز بین ردیف‌های آرایه‌های فتوولتاییک به عواملی مانند عرض جغرافیایی محل، ارتفاع ردیف‌ها و زمان و موقعیت روز و سال بستگی دارد. بر اساس شکل ۴، برای جلوگیری از سایه در بازه زمانی ۹ صبح

کارهای الهناوی و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۲۳] و نونس و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۲۴] است.

در ایران نیز مطالعات موردی بر پارکینگ‌های خورشیدی انجام شده است. از جمله، مرانی و همکاران در سال ۲۰۱۴ به شبیه‌سازی و بررسی اقتصادی و زیست‌محیطی پارکینگ خورشیدی برای خودروهای با پیل سوختی پرداخته‌اند [۲۵]. حسین‌نیا و طوسی در سال ۲۰۱۹ عملکرد بهینه ریزشکبه‌های مبتنی بر تولید پراکنده را با توجه به برنامه‌های پاسخ به تقاضا بررسی کرده‌اند [26]. مختارزاده و گرجیان امکان‌سنجی و طراحی پارکینگ خورشیدی را در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس بررسی کرده‌اند. در این مطالعه، سامانه فتوولتاییک با توجه به شرایط جغرافیایی و آب‌وهوایی شهر تهران طراحی شده است. بر اساس محاسبات، میزان تولید برق سالانه پارکینگ ۲۰۴۸ مگاوات‌ساعت برآورد شده است [27].

با توجه به مقالات فوق، این مطالعه علاوه بر رویکرد نظری، به جنبه‌های اجرایی و عملیاتی نیز پرداخته است.

## 2- موارد و روش‌ها

### 2-1- مشخصات و پارامترهای جغرافیایی

نیروگاه فتوولتاییک، یا به عبارتی پارکینگ خورشیدی موجود، در محوطه ستاد شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان شرقی واقع شده است. موقعیت جغرافیایی نیروگاه شامل طول جغرافیایی ۴۶،۳۳۷ درجه، عرض جغرافیایی ۳۸،۰۶۶ درجه و ارتفاع ۱۴۵۷ متر از سطح دریا است. این نیروگاه بر روی سه مجموعه پارکینگ قرار گرفته که انحراف آن‌ها از جنوب به سمت غرب ۱۲ درجه ( $\theta=12^\circ$ ) می‌باشد. مساحت‌های این سه مجموعه به ترتیب ۱۳۴،۵، ۱۶۸،۲ و ۲۵۲،۳ مترمربع است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، این سه مجموعه پارکینگ در طول خود، به ازای هر ۵،۸ متر، دارای اختلاف ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر هستند.

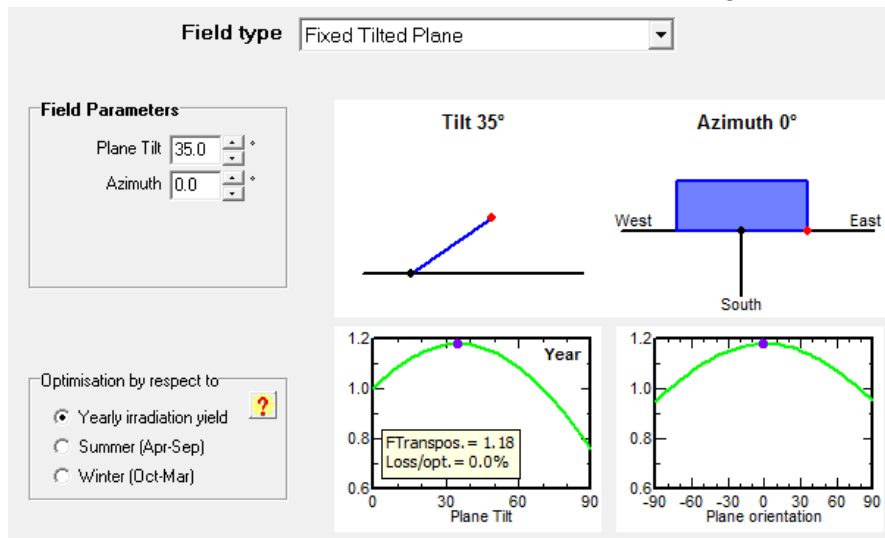


شکل ۲ محوطه ستاد شرکت توزیع برق آذربایجان شرقی

### 2-2- طراحی سیستم

اولین مسئله در طراحی و اجرای یک نیروگاه فتوولتاییک متصل به شبکه، تعیین محدودیت‌های بودجه، توان و مساحت در دسترس است. خروجی اصلی، توان نیروگاه خواهد بود. هدف در نظر گرفته‌شده برای طراحی این نیروگاه، استفاده حداکثری از سطح موجود به منظور استخراج بیشترین انرژی

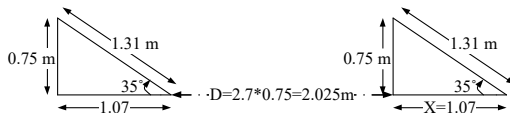
تا ۳ بعد از ظهر در طول کل سال، در عرض جغرافیایی ۳۸ درجه شهر تبریز، حداقل فاصله بین ردیف‌ها باید ۲۰۷ برابر ارتفاع پنل‌ها در نظر گرفته شود.



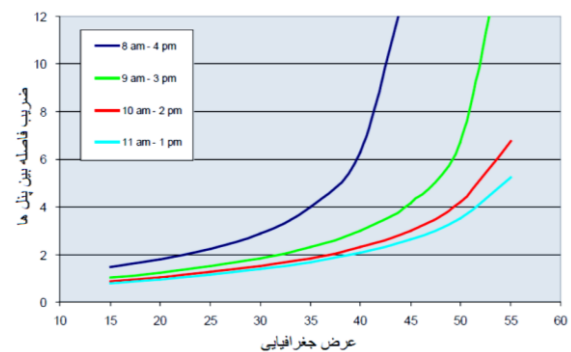
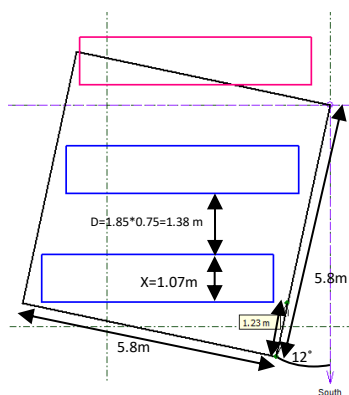
شکل ۳ زاویه و جهت گیری بهینه پنل‌ها در شهر تبریز

۳. تغییر جهت‌گیری پنل‌ها از روبه جنوب ( $s=0$ ) به ۱۲ درجه انحراف از جنوب به سمت غرب ( $s=12$ )

با افزایش تعداد ردیف‌ها به سه ردیف و کاهش زمان عدم سایه‌اندازی از شش ساعت به دو ساعت، همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است، فاصله بین ردیف‌ها را می‌توان به حدود  $1/85$  برابر ارتفاع ردیف‌ها کاهش داد. در این حالت، با شریط قبل، می‌توان دو ردیف ۵ تایی پنل را بر روی هر یک از مربع‌ها، مشابه آنچه در شکل ۶ نشان داده شده است، نصب کرد.



شکل ۵ کمترین فاصله مورد نیاز بین ردیف‌های آرایه‌های فتوولتائیک به منظور اجتناب از سایه در شش ساعت از کوتاهترین روز سال

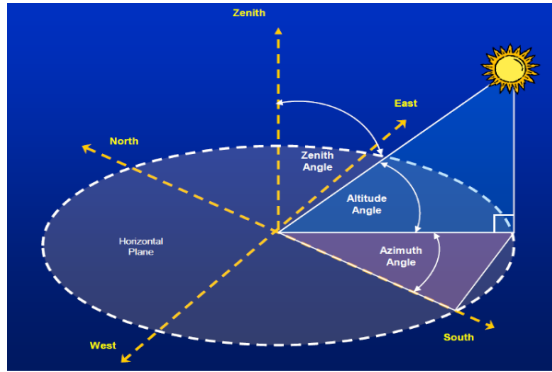


شکل ۴ ارتباط عرض جغرافیایی با ضریب فاصله پنل‌ها (کمترین فاصله مورد نیاز بین ردیف‌های آرایه‌های فتوولتائیک به منظور اجتناب از سایه) [27].

ابعاد پنل‌ها و محاسبات ارائه‌شده در شکل ۵ نشان می‌دهند که فاصله بین دو ردیف باید حداقل ۲۰۲۵ متر باشد که با توجه به ساختار خاص سازه پارکینگ (مربع‌هایی به ابعاد ۵۰۸ متر در ۵۰۸ متر با اختلاف ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر) حداکثر می‌توان دو ردیف ۵ تایی (۲۰۰۰ وات) پنل را بر روی هر مربع نصب کرد (شکل ۶). در این حالت، تراکم توان برابر با  $59,453$  وات بر مترمربع خواهد بود. این چیدمان در طول بیشتر ایام سال، سایه‌اندازی مناسبی روی خودروها ایجاد نمی‌کند. برای ایجاد توازن در استفاده از سقف پارکینگ موجود برای نصب پنل‌ها و دستیابی به بازدهی مناسب، می‌توان تعداد ردیف‌ها را افزایش داد. ردیف‌های آرایه‌ها می‌توانند با فاصله‌های نزدیک‌تر و زاویه شیب کمتر چیده شوند. لذا سه تغییر نسبت به حالت ایده‌آل پیشنهاد می‌شود:

۱. کاهش زمان عدم سایه‌اندازی از شش ساعت به دو ساعت در کوتاه‌ترین روز سال (۳۰ آذر یا ۲۱ دسامبر).
۲. کاهش زاویه نصب پنل‌ها از ۳۵ درجه به ۳۰ درجه.

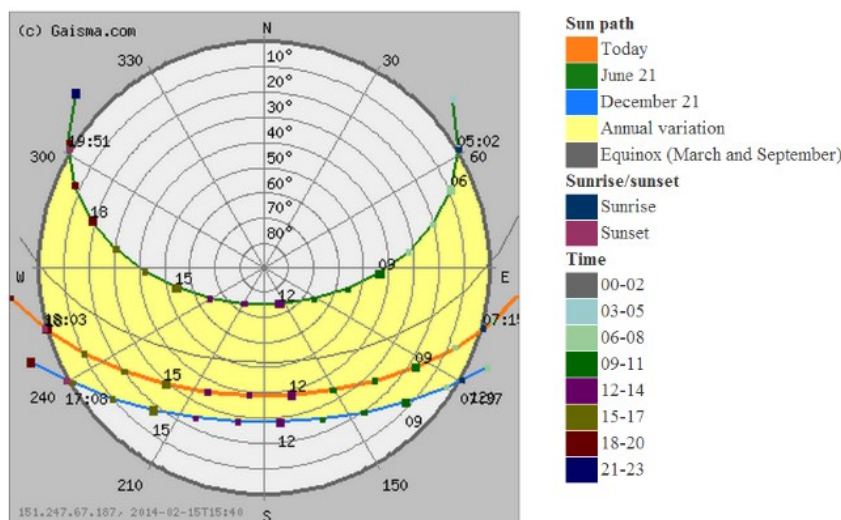
شکل 6 عدم جا گیری سه ردیف پنل با زاویه شیب 35 درجه و تمایل رو به جنوب



شکل 7 زوایای گرا و ارتفاع خورشیدی [30].

شکل 8 نمودار مسیر خورشید برای شهر تبریز را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، در کوتاه‌ترین روز سال (۲۱ دسامبر) خورشید در کمترین ارتفاع خود، حدود ۲۸/۵ درجه در ظهر قرار دارد و بلندترین سایه در این روز ایجاد می‌شود. همچنین، در بلندترین روز سال (۲۱ ژوئن) ارتفاع خورشید حدود ۷۵ درجه در ظهر است و کوتاه‌ترین سایه در این روز مشاهده خواهد شد.

به منظور حذف فاصله ۱/۲۳ متری ناشی از انحراف ۱۲ درجه‌ای سازه پارکینگ نسبت به جنوب، پنل‌ها به صورت موازی با سازه پارکینگ و با ۱۲ درجه انحراف از جنوب به سمت غرب ( $s=12^\circ$ ) قرار داده شده‌اند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، این امر نه تنها موجب کاهش راندمان نمی‌شود، بلکه به دلیل افزایش فاصله بین ردیف‌ها و کاهش سایه، باعث افزایش راندمان نیز می‌گردد. همچنین، این چیدمان نصب را ساده‌تر کرده و به منظم شدن آرایه‌ها بر روی پارکینگ و زیبایی نهایی طرح کمک می‌کند. با توجه به شکل 6 در حالت زاویه شیب 35 درجه حتی با قرار دادن ردیف‌ها موازی با سازه پارکینگ با توجه به رابطه  $3X+2D=5.984$  متر سه ردیف پنل در طول ۵/۸ متری جا نخواهند شد. برای تعیین زاویه شیب بهینه پنل‌ها به منظور جلوگیری از سایه‌افکنی در دو ساعت از کوتاه‌ترین روز سال و در عین حال جا شدن سه ردیف در طول ۵/۸ متر، از تحلیل سایه استفاده می‌شود. برای بررسی تأثیر سایه بر سلول‌های فتوولتاییک، از نمودار مسیر خورشید استفاده می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، زاویه گرای خورشیدی مسیر تصویر خورشید را بر روی سطح افق نسبت به یک نقطه مشخص تعیین می‌کند. در برخی نرم‌افزارها مانند PVSSyst جنوب به عنوان مرجع و با زاویه صفر درجه در نظر گرفته می‌شود؛ در این حالت، غرب با زاویه ۹۰ درجه و شرق با زاویه ۹۰- درجه نمایش داده می‌شوند.



شکل 8 نمودار مکانی و مسیر خورشید برای شهر تبریز [29].

لذا برای عرض جغرافیایی ۳۸،۰۶۶، بیشترین زاویه ارتفاع خورشیدی در روز ۲۱ ژوئن برابر با:

$$90^\circ - 38,066^\circ + 23,45^\circ = 75,384^\circ$$

و کمترین زاویه ارتفاع خورشیدی در روز ۲۱ دسامبر برابر با:

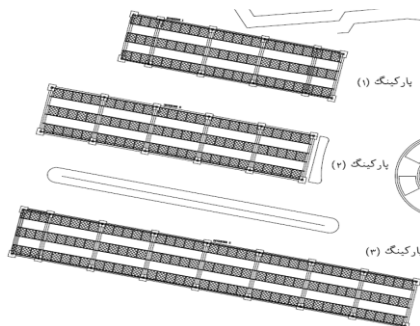
$$90^\circ - 38,066^\circ - 23,45^\circ = 28,484^\circ$$

مطابق شکل 9 زاویه انحراف خورشید ( $\delta$ ) یک زاویه متغیر میان صفحه استوا و اشعه خورشید است که به دلیل مدار بیضی‌شکل زمین به دور خورشید و کجی محور آن، در طول سال به طور سینوسی از  $-23/45^\circ$  درجه تا  $+23/45^\circ$  درجه تغییر می‌کند. بنابراین، برای هر عرض جغرافیایی، بیشترین و کمترین زاویه ارتفاع خورشیدی به ترتیب از روابط (1) و (۲) قابل محاسبه اند [۱۱]:

$$MAX_{SolarAzimuthAngle} = 90^\circ - Altitude + 23.45^\circ \quad (1)$$

$$MIN_{SolarAzimuthAngle} = 90^\circ - Altitude - 23.45^\circ \quad (2)$$

$\varphi=31$	$H=0.674$	$X=1.122$	$D=1.24$	5.84	×
$\varphi=30$	$H=0.655$	$X=1.134$	$D=1.20$	5.80	OK



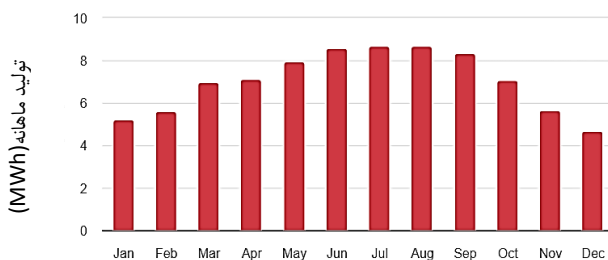
شکل 11 چیدمان نهایی پنل‌ها بر روی سه پارکینگ

در این مقاله، برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار PVSyst استفاده شده است. شبیه‌سازی در دو حالت انجام گرفته است: حالت ایده‌آل یعنی دو ردیف پنل با زاویه شیب ۳۵ درجه و جهت‌گیری روبه‌جنوب مطابق شکل 13، و حالت حاصل از محاسبات و طراحی‌ها یعنی سه ردیف پنل با زاویه شیب ۳۰ درجه و جهت‌گیری ۱۲ درجه انحراف از جنوب به سمت غرب مطابق شکل 14. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در جدول ۳ منعکس گردیده است. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، پارکینگ شماره ۲ به‌عنوان نمونه انتخاب شده و نتایج حاصل به کل مجموعه تعمیم داده شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی در جدول ۳، مشخص است که هرچند در حالت اول، تلفات سایه در کوتاه‌ترین روز سال بسیار کمتر از حالت دوم است، اما انرژی نرم‌شده روزانه به ازای هر کیلووات پیک پنل نصب‌شده برای هر دو حالت تقریباً یکسان است. با این حال، انرژی تولیدی سالانه برای حالت دوم بیشتر از حالت اول است.

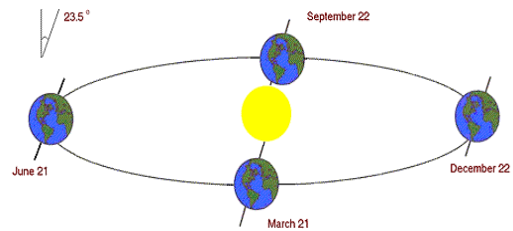
جدول 3 نتایج شبیه‌سازی

State	انرژی نرم شده روزانه (kwh/kwp/day)	انرژی سالانه تولیدی (kwh/yr)	تلفات سایه در کوتاه‌ترین روز (%)
Tilt=35 S=0 Row=2	4.7	17166	1.2
Tilt=30 S=12 Row=3	4.69	25654	4.5

شکل 12 تولید ماهانه انرژی فتوولتائیک را نشان می‌دهد.



شکل 12 تولید ماهانه انرژی فتوولتائیک



شکل 9 زاویه انحراف خورشید (δ) و تغییرات آن [29]

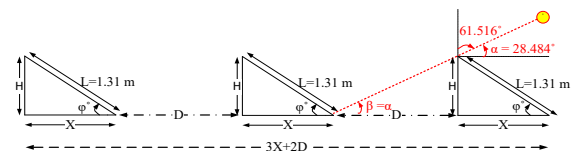
با توجه به شکل 10 مشخص است که طول قاعده (X)، ارتفاع (H) و فاصله بین آرایه‌ها (D) از روابط (3)، (4) و (5) و طول مورد نیاز جهت چینش سه ردیف پنل از رابطه (6) بدست می‌آید.

$$H = L \sin \varphi \quad (3)$$

$$X = L \cos \varphi \quad (4)$$

$$D = H \cot \beta \quad (5)$$

$$TheRequiredLength = 3X + 2D \quad (6)$$



شکل 10 کمترین فاصله مورد نیاز بین ردیف‌های آرایه‌های فتوولتائیک به منظور اجتناب از سایه در دو ساعت از کوتاه‌ترین روز سال

با توجه به اینکه طول پنل (L) برابر ۱٫۳۱ متر و زاویه ارتفاع خورشید ( $\alpha$ ) حدود ۲۸٫۴۸۴ درجه در دو ساعت ظهر است، با شروع از زاویه شیب ۳۵ درجه و کاهش زاویه، پارامترهای فوق محاسبه می‌شوند تا در نهایت طول مورد نظر یعنی ۵٫۸ متر حاصل شود. نتایج این محاسبات به‌طور خلاصه در جدول ۲ ذکر شده است. همان‌گونه که مشخص است، زاویه شیب ۳۰ درجه به‌عنوان زاویه مناسب برای نصب پنل‌ها انتخاب می‌شود.

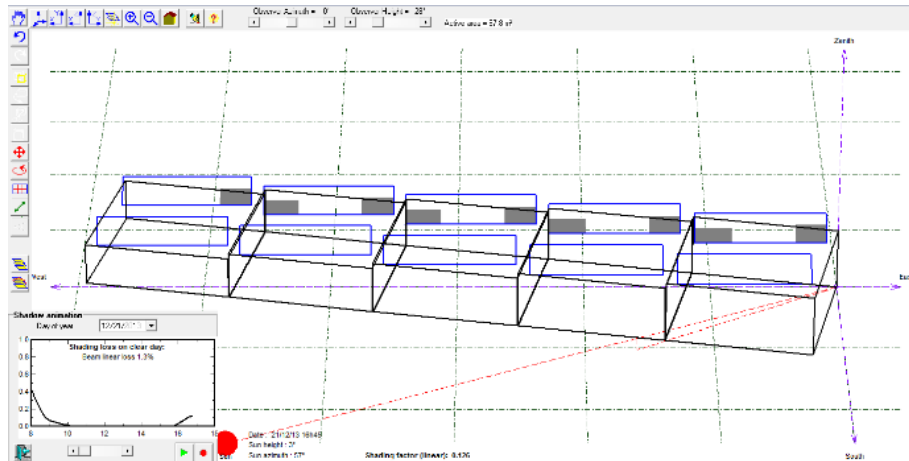
### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- نتایج شبیه‌سازی

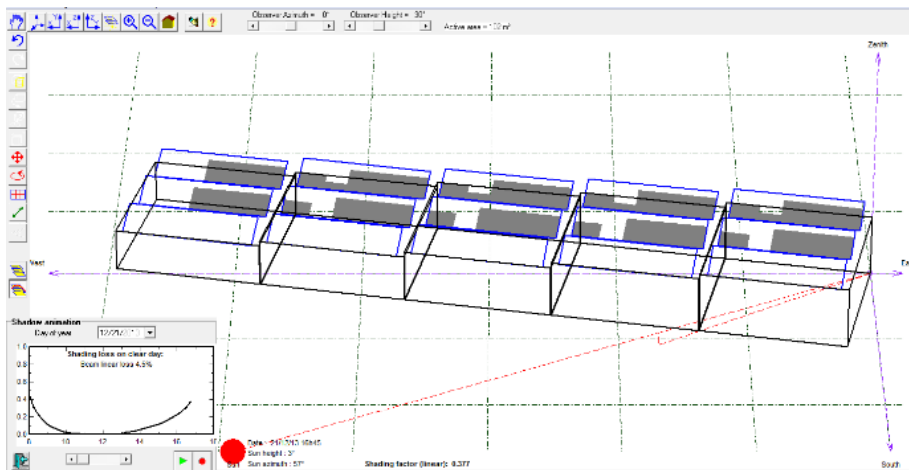
با انتخاب زاویه شیب ۳۰ درجه و جهت‌گیری ۱۲ درجه به سمت غرب، و با توجه به اینکه عرض پنل‌ها ۰٫۹۹ متر است، می‌توان سه ردیف ۵ تایی از پنل‌ها را بر روی هر کدام از مربع‌های ۵٫۸ × ۵٫۸ متر قرار داد. مطابق شکل ۱۱ می‌توان تعداد ۶۳ پنل بر روی پارکینگ شماره ۱، ۷۵ پنل بر روی پارکینگ شماره ۲ و ۱۱۴ پنل بر روی پارکینگ شماره ۳ نصب نمود و در مجموع ۲۵۲ پنل بر روی پارکینگ‌ها قرار داد.

جدول 2 محاسبات زاویه شیب مناسب

وضعیت	طول مورد نیاز	فاصله آرایه	طول قاعده	ارتفاع آرایه	زاویه شیب
×	5.97	D=1.38	X=1.073	H=0.751	$\varphi=35$
×	5.93	D=1.34	X=1.086	H=0.732	$\varphi=34$
×	5.91	D=1.31	X=1.098	H=0.713	$\varphi=33$
×	5.87	D=1.27	X=1.110	H=0.694	$\varphi=32$



شکل 13 شبیه‌سازی سایه در حالت دو ردیف پنل با فاصله 2/025 متر از هم و زاویه شیب 35 درجه و جهت گیری روبه جنوب



شکل 14 شبیه‌سازی سایه در حالت سه ردیف پنل با فاصله 1/2 متر از هم و زاویه شیب 30 درجه و با جهت گیری 12 درجه انحراف از جنوب

### 3-2- انتخاب اینورترها

با توجه به نتایج شبیه‌سازی که حالت سه ردیف پنل با زاویه شیب 30 درجه و جهت گیری 12 درجه انحراف از جنوب به سمت غرب را تأیید کرد، می‌توان از تعداد 252 دستگاه پنل 200 وات با مشخصات یادشده استفاده نمود. در این صورت، ظرفیت کل نیروگاه 50.4 کیلووات خواهد شد. برای نیروگاه 50.4 کیلوواتی می‌توان از اینورترهایی با توان‌های متفاوت بهره برد. یکی از شرکت‌های معتبر در این زمینه، شرکت SMA آلمان است که محصولات متنوعی در محدوده‌های توانی مختلف با قیمت‌های متفاوت عرضه می‌کند. آنچه در انتخاب اینورتر باید مدنظر قرار گیرد، رنج توان، ولتاژ و جریان ورودی اینورتر می‌باشد.

- ولتاژ دامنه کاری شامل: ولتاژ پنل و ولتاژ ورودی اینورتر.
- بیشترین ولتاژ ورودی
- حداکثر جریان ورودی اینورتر
- میزان توان پنل‌های خورشیدی
- نوع پنل یا نوع تکنولوژی مورد استفاده در پنل
- تطابق کارایی یا راندمان پنل و اینورتر
- تطبیق با ویژگی‌های محیطی و شرایط نصب
- توان پشتیبان جهت اطمینان از عملکرد سیستم در تمام حالات
- سازگاری با فناوری‌های دیگر اینورتر و پنل‌های جدید آینده [32].

نرم‌افزار SMA Sunny Design محصول شرکت SMA، نرم‌افزاری است که با توجه به ظرفیت نیروگاه، برند و نوع پنل مربوطه و سطح ولتاژ اتصال اینورتر، حالت‌های مناسب انتخاب اینورترها را مشخص می‌کند. در بسیاری از موارد، می‌توان نسبت اینورتر به آرایه‌های متصل به آن را کمتر از 100 درصد انتخاب کرد. این بدان معناست که توان DC آرایه در شرایط

### 3-2-1- معیار سازگاری پنل خورشیدی با اینورتر

معیار سازگاری پنل خورشیدی با اینورتر در انتخاب تجهیزات یک نیروگاه فتوولتائیک شامل چندین عامل کلیدی است که اهمیت بالایی در عملکرد و کارایی سیستم دارند. این عوامل عبارتند از:

Max. DC current	33 A	11 A
Max. short-circuit current	50 A	12.5 A

### 3-3- تحلیل و محاسبات اقتصادی

#### 3-3-1 روش بررسی مالی و اقتصادی

از آنجایی که ارزش واقعی پول با گذشت زمان کاهش می‌یابد، یا به عبارتی، با ثابت ماندن مبلغ اسمی پول، ارزش واقعی آن در طول زمان کاهش پیدا می‌کند، این تفاوت در قالب درصدهایی که ارزش یک سال را نسبت به سال دیگر می‌سنجد، مشخص می‌شود. این درصد، نرخ تنزیل یا تعدیل مطلوب سرمایه‌گذار نامیده می‌شود.

بر اساس مفهوم ارزش زمانی پول دو پارامتر اصلی ارزش حال خالص و نرخ بازده داخلی قابل محاسبه هستند؛ ارزش حال خالص پروژه برابر با اختلاف بین منافع و هزینه‌های پروژه و خالص اثرات هر گزینه با در نظر گرفتن توزیع زمانی آنها بر اساس نرخ تنزیل مورد نظر است. چنانچه فرایند مالی پروژه از سرمایه اولیه (P)، درآمد خالص سالیانه (A) و عمر مفید (n) تشکیل شده باشد، با فرض نرخ تنزیل ارزش حال خالص (NPV) بصورت رابطه (7) محاسبه می‌شود:

$$NPV = -P + \sum_{m=1}^n \frac{A}{(i+1)^m} \quad (7)$$

بر اساس رابطه فوق، اگر ارزش حال خالص پروژه مثبت باشد، سوددهی پروژه بیش از نرخ تنزیل است و بنابراین می‌توان پروژه را پذیرفت. در غیر این صورت، طرح فاقد توجیه اقتصادی خواهد بود. از آنجا که محاسبه شاخص ارزش حال خالص پروژه وابسته به انتخاب نرخ تنزیل است و معمولاً انتخاب آن وابسته به نظر کارشناسان مختلف متفاوت است، شاخص نرخ بازده داخلی (IRR) که مستقل از شرایط بوده و در عین حال واجد مفهوم ارزش زمانی پول است، می‌تواند به عنوان شاخصی کلیدی مورد توجه قرار گیرد. نرخ بازده داخلی، نرخ تنزیلی است که بر اساس آن هزینه‌ها و منافع پروژه با هم برابر می‌گردند. به عبارت دیگر، در این نرخ، ارزش حال خالص پروژه برابر با صفر خواهد بود. این نرخ نشانگر سوددهی واقعی پروژه است. بر این اساس، نرخ بازده داخلی از حل رابطه غیرخطی زیر و با محاسبه آن به صورت رابطه (8) به دست می‌آید:

$$-P + A \left( \frac{(i+1)^n - 1}{i(i+1)^n} \right) = 0 \quad (8)$$

اگر نرخ بازده داخلی محاسبه شده یک طرح، بالاتر از نرخ تنزیل مورد نظر باشد، طرح برای سرمایه‌گذاری مناسب خواهد بود [۳۱]. در تحلیل حاضر علاوه بر موارد فوق، دوره بازگشت سرمایه نیز محاسبه شده است. دوره بازگشت سرمایه (P.P) دوره یا مدت زمانی است که طی آن سرمایه اولیه توسط جریان درآمد خالص جبران می‌شود. این دوره از رابطه (۹) قابل محاسبه است:

$$P.P = \frac{P}{A} \quad (9)$$

با توجه به سادگی محاسبه در این روش، در این مقاله از این روش جهت محاسبه توجیه پذیری اقتصادی پروژه استفاده شده است.

#### 3-3-2 نتایج محاسبات اقتصادی

موفقیت اجرای هر پروژه وابسته به سرمایه‌گذاری مالی، مزایا و مدت زمان بازگشت سرمایه می‌باشد. مطالعات موردی گذشته و نتایج آن‌ها، حاکی از امکان اجرای موفق پارکینگ‌های خورشیدی با بیشترین تولید انرژی الکتریکی

استاندارد، بزرگ‌تر از توان AC خروجی اینورتر است. دلایل متعددی برای این کار وجود دارد: نخست اینکه شرایط تست استاندارد برای اندازه‌گیری توان پنل‌ها در دنیای واقعی به ندرت رخ می‌دهد. علاوه بر این، عواملی مانند گرد و غبار، آلودگی و افزایش عمر، موجب کاهش کارایی پنل‌ها می‌شوند. در نرم‌افزار SMA Sunny Design، نسبت توان نامی اینورتر به آرایه بین ۹۰ درصد تا ۱۱۰ درصد در نظر گرفته شده است.

با توجه به توضیحات فوق و در نظر گرفتن قیمت، یک اینورتر ۱۵ کیلووات با نسبت توان نامی ۹۶ درصد و سازگاری با پنل‌های پیشنهادی مطابق جدول ۴ بر روی پارکینگ شماره ۱، یک اینورتر ۱۵ کیلووات با نسبت توان نامی ۱۰۲ درصد و سازگاری با پنل‌های پیشنهادی مطابق جدول ۵ بر روی پارکینگ شماره ۲، و یک اینورتر ۱۷ کیلووات با نسبت توان نامی ۹۰ درصد و سازگاری با پنل‌های پیشنهادی مطابق جدول ۶ بر روی پارکینگ شماره ۳، طبق پیشنهادهای نرم‌افزار انتخاب و نصب گردیده است. لازم به ذکر است اینورترهای انتخابی سه‌فاز، بدون ترانسفورماتور بوده و دارای دو ورودی مستقل از هم می‌باشند.

جدول 4 سازگاری اینورتر 1 و پنل‌ها

STP 15000TL	Input A	Input B
Number of strings	4	1
PV modules per string	17	12
Peak power (input)	13.6 KWp	2.4KWp
Typical PV voltage	610 v ✓	430 v ✓
Min. PV voltage	554 v ✓	391 v ✓
Min. DC voltage (PV)	150 v	150 v
Max. PV voltage	908 v ✓	641 v ✓
Max. DC voltage (PV)	1000 v	1000 v
Max. current of PV array	21.7 A ✓	5.4 A ✓
Max. DC current	33 A	11 A
Max. short-circuit current	50 A	12.5 A

جدول 5 سازگاری اینورتر 2 و پنل‌ها

STP 15000TL	Input A	Input B
Number of strings	4	1
PV modules per string	15	15
Peak power (input)	12 KWp	3 KWp
Typical PV voltage	538 v ✓	538 v ✓
Min. PV voltage	489 v ✓	489 v ✓
Min. DC voltage (PV)	150 v	150 v
Max. PV voltage	802 v ✓	802 v ✓
Max. DC voltage (PV)	1000 v	1000 v
Max. current of PV array	21.7 A ✓	5.4 A ✓
Max. DC current	33 A	11 A
Max. short-circuit current	50 A	12.5 A

جدول 6 سازگاری اینورتر 3 و پنل‌ها

STP 17000TL	Input A	Input B
Number of strings	5	1
PV modules per string	17	12
Peak power (input)	17 KWp	2.4KWp
Typical PV voltage	610 v ✓	430 v ✓
Min. PV voltage	554 v ✓	391 v ✓
Min. DC voltage (PV)	150 v	150 v
Max. PV voltage	908 v ✓	641 v ✓
Max. DC voltage (PV)	1000 v	1000 v
Max. current of PV array	27.1 A ✓	5.4 A ✓

4	ضریب تعدیل	25%
5	هزینه ثابت اولیه (هزینه احداث)	12000 میلیون ریال
6	هزینه متغیر (هزینه تعمیر و نگهداری)	192 میلیون ریال
7	سال اول	
7	نرخ تورم به طور میانگین	30%
8	کاهش تولید انرژی سالیانه نیروگاه	1%

**جدول 8** روابط لازم برای انجام محاسبات اقتصادی طرح

متغیر	مقدار
درآمد سالانه در سال t	انرژی تولیدی t * نرخ خرید برق t
هزینه سالانه در سال t	$(1+0.3)^{t-1}$ * هزینه متغیر سال اول
تولید انرژی سالانه در سال t	$(1+0.1)^{t-1}$ * تولید انرژی سال اول
نرخ خرید برق سالانه در سال t	$22000 * (1+0.25)^{t-1}$
مدت زمان محاسبه درآمد و هزینه	15 سال
کل درآمد یا درآمد تجمعی $C_t$	$C_t = \sum_{j=1}^{t=15} j$
هزینه کل یا هزینه تجمعی	هزینه سال $j = \sum_{j=1}^{t=15} j$ + هزینه اولیه = هزینه کل
بازگشت سرمایه	$\left( \frac{\text{هزینه کل} - \text{کل درآمد}}{\text{هزینه کل}} \right) * 100$

در جدول 9، هزینه های تعمیر و نگهداری پارکینگ شامل هزینه های بازرسی دوره ای و هزینه نظافت دوره ای آورده شده است.

**جدول 9** هزینه تعمیر و نگهداری پارکینگ خورشیدی (هزینه های متغیر)

ردیف	هزینه متغیر	تعداد دفعات	هزینه هر دوره (ریال)	هزینه کل در ماه (ریال)
1	بازرسی دوره ای	1	6000000	6000000
2	نظافت دوره ای	2	5000000	10000000
3	هزینه کل	-	-	16000000

خورشیدی است. در پروژه حاضر، احداث پارکینگ خورشیدی بر روی سازه های سه پارکینگ موجود در محوطه ستادی شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان شرقی انجام شده است. بنابراین، هزینه احداث سازه پارکینگ در محاسبات اقتصادی لحاظ نمی شود. تخمین هزینه ها با توجه به هزینه نصب تأسیسات فتوولتائیک توسط دولت و تعرفه خرید تضمینی برق انجام می شود.

ظرفیت نیروگاه خورشیدی با توجه به راندمان خروجی، یا همان توان تولید شده، به طور میانگین در سال اول 70 الی 85 درصد است. تابش، مهم ترین عامل تأثیرگذار در درآمد نیروگاه است؛ به گونه ای که می تواند تولید نیروگاه را به میزان قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، هرچه هوا خنک تر باشد، راندمان نیروگاه بهتر و تولید بیشتری خواهد بود.

نوع تکنولوژی پنل های خورشیدی و سایر تجهیزات جانبی مانند اینورتر، نقش مهمی در راندمان و عمر مفید نیروگاه ایفا می کنند. انتخاب پنل ها و تجهیزات با راندمان بالا می تواند به افزایش تولید برق و، در نتیجه، افزایش درآمد نیروگاه منجر شود. پنل های خورشیدی مونوکریستالی، از راندمان بالاتری نسبت به پنل های پلی کریستالی برخوردارند. همچنین، نسل جدید پنل های خورشیدی باعث شده است تا راندمان تولیدی نیروگاه ها افزایش یابد، اما هزینه های این پنل ها بالاتر است.

انتخاب اینورتر مناسب با ظرفیت و راندمان بالا می تواند به افزایش راندمان و تولید برق نیروگاه کمک کند. از این رو، در اینجا، در انتخاب تجهیزات حساسیت و دقت بیشتری به خرج داده شده است.

هزینه های احداث و نگهداری نیروگاه خورشیدی شامل هزینه های خرید تجهیزات، نصب، تعمیرات و نگهداری می شود. کاهش این هزینه ها از طریق انتخاب تجهیزات مناسب، استفاده از روش های نوین نصب و احداث، و انعقاد قراردادهای بلندمدت برای خرید تجهیزات، می تواند به افزایش سودآوری نیروگاه کمک کند. هزینه های احداث نیروگاه خورشیدی به عواملی مانند ظرفیت، نوع پنل ها و تجهیزات، و روش نصب بستگی دارد. همچنین، هزینه های نگهداری شامل تعمیرات و نظافت پنل ها می شود و معمولاً 3 تا 5 درصد از درآمد نیروگاه صرف تعمیر و نگهداری آن می گردد.

در نیروگاه های خورشیدی مقیاس کوچک با ظرفیت بین 20 کیلووات تا یک مگاوات، نرخ خرید پایه تضمینی برق 22,000 ریال می باشد. با توجه به ظرفیت، موقعیت مکانی، نوع تکنولوژی و تعرفه های خرید برق، می توان درآمد سالانه و ماهانه نیروگاه خورشیدی را محاسبه کرد. همچنین، می توان نقطه سر به سر و دوره بازگشت سرمایه را محاسبه کرد تا مشخص شود که چه زمانی سرمایه گذاری اولیه باز خواهد گشت [28].

شکل 15، نمودار هزینه های کل راه اندازی شامل هزینه پنل های خورشیدی، اینورتر، تابلو برق، فیوزهای حفاظتی و کابل کشی، نصب، راه اندازی و حمل تجهیزات را نشان می دهد که قیمت روز آن حدود 12 میلیارد ریال می باشد. جدول 7 مقادیر اولیه انجام محاسبات اقتصادی طرح را نشان می دهد. در جدول 8 نیز روابط لازم برای انجام محاسبات اقتصادی طرح آمده است.

**جدول 7** مقادیر اولیه برای انجام محاسبات اقتصادی طرح

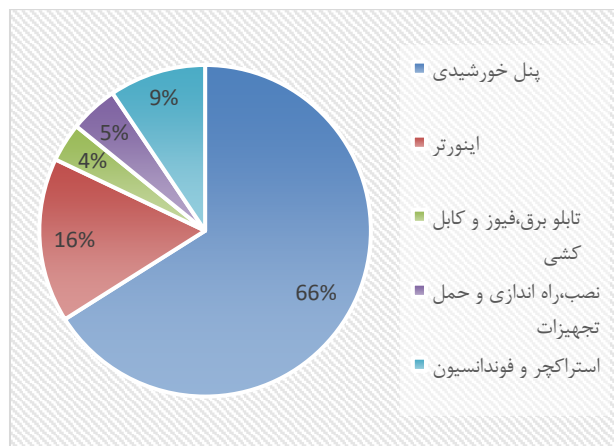
ردیف	متغیر	مقدار
1	میزان انرژی تولیدی در سال اول	80000 کیلو وات ساعت
2	ظرفیت سیستم	50/4 کیلو وات پیک
3	نرخ خرید تضمینی برق	22000 ریال

است. مشاهده می‌شود، بازگشت سرمایه و هزینه‌های کلی در این سال به میزان ۳۴ درصد اتفاق می‌افتد.

در محاسبات اقتصادی، به نقطه‌ای که در آن هزینه‌های کلی و درآمد کلی با یکدیگر برابر می‌شوند و از آن نقطه به بعد، طرح به سوددهی می‌رسد، نقطه سر به سر گفته می‌شود. در نقطه سر به سر، تمامی هزینه‌ها برگشت داده می‌شوند، اما هنوز سود برابر با صفر است. در نمودار شکل ۱۶، نقطه برخورد منحنی هزینه کل و درآمد تجمعی نشان داده شده است. از این نمودار مشاهده می‌شود که بازگشت سرمایه اندکی پس از سال چهارم و در کمتر از ۵ سال اتفاق می‌افتد. پس از نقطه سر به سر، سوددهی پروژه آغاز خواهد شد.

**جدول 10** کل هزینه‌های احداث و تعمیر و نگهداری در 5 سال ابتدایی پروژه

سال	هزینه ثابت (میلیون ریال)	هزینه متغیر (هزار ریال)	هزینه کل (هزار ریال)	هزینه کل تجمعی (هزار ریال)
اول	12000	192000	12192000	12192000
دوم	-	249600	12441600	249600
سوم	-	324480	12766080	324480
چهارم	-	421824	13187904	421824
پنجم	-	548371/2	13736275/2	548371/2



**شکل 15** نمودار هزینه احداث و تجهیزات پارکینگ خورشیدی

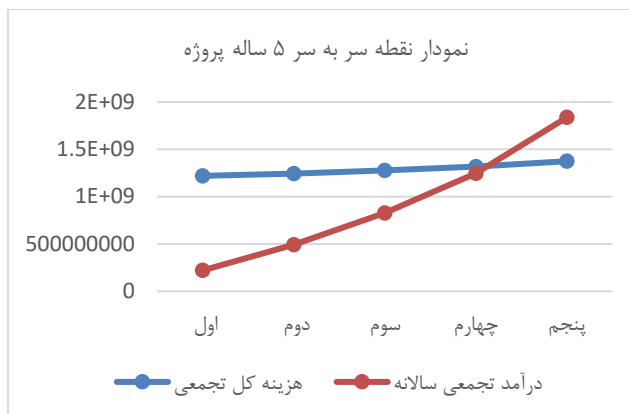
در نهایت، مجموع کل هزینه‌ها معادل مجموع هزینه ثابت سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های متغیر سالیانه تعمیر و نگهداری خواهد بود که در جدول ۱۰ برای ۵ سال ابتدایی پروژه آورده شده است. مطابق جدول ۱۱، افزایش سالانه نرخ نهایی خرید برق برابر با ۲۵ درصد خواهد بود که به صورت ضریب تعدیل در نرخ پایه ضرب شده و قیمت نهایی برآورد شده است. همچنین، در سال پنجم، درآمد تجمعی سالیانه حدود ۱۸,۳۶۵,۹۹۹,۵۲۰ ریال به دست می‌آید، در حالی که در همین سال، هزینه تجمعی معادل ۱۳,۷۳۶,۲۷۵,۲۰۰ ریال

**جدول 11** درآمد سالانه و تجمعی حاصل از فروش برق خورشیدی در طی 15 سال

سال	انرژی تولیدی (کیلو وات ساعت)	نرخ پایه (ریال)	ضریب تعدیل	نرخ نهایی خرید برق (ریال)	درآمد سالانه (ریال)	درآمد تجمعی سالانه (ریال)
اول	80000	22000	1/25	27500	2200000000	2200000000
دوم	79200	22000	1/56	34320	4918144000	2718144000
سوم	78408	22000	1/95	42900	8281847200	3363703200
چهارم	77624	22000	2/44	53680	12448703520	4166856320
پنجم	76848	22000	3/50	77000	18365999520	5917296000
ششم	76079	22000	3/81	83820	24742941300	6376941780
هفتم	75318	22000	4/77	104940	32646812220	7903870920
هشتم	74565	22000	5/96	131120	42423775020	9776962800
نهم	73819	22000	7/45	163900	54522709120	12098934100
دهم	73081	22000	9/31	204820	69491159540	14968450420
یازدهم	72350	22000	11/64	256080	88018547540	18527388000
دوازدهم	71627	22000	14/55	320100	110946350240	22927802700
سیزدهم	70911	22000	18/19	400180	139323514220	28377163980
چهاردهم	70202	22000	22/74	500280	174444170780	35120656560
پانزدهم	69500	22000	28/42	625240	217898350780	43454180000



- [4] H. N. Afrouzi, S. V. Mashak, A. M. Dastgheib, and J. Tavalaei, Economic sizing of solar array for a photovoltaic building in Malaysia with Matlab, in *Proceedings of the First International Conference on Informatics and Computational Intelligence*, Bandung, Indonesia, pp. 306-311, 2011.
- [5] O. Barra, M. Conti, E. Santamata, O. Scarmozzino, and R. Visentin, Shadow effect in large solar collectors in large-scale solar power plants, *Solar Energy*, Vol. 19, pp. 759-762, 1977.
- [6] L. Phyo Naing and D. Srinivasan, Estimation of solar power generating capacity, in *Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Singapore, pp. 95-100, 2010.
- [7] S. I. Sulaiman, T. K. Abdul Rahman, I. Musirin and S. Shaari, Sizing grid-connected photovoltaic system using genetic algorithm, in *Proceedings of the IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, Langkawi, Malaysia, pp. 505-509, 2011.
- [8] A. Mellit, M. Benghanem, A. Hadj Arab, A. Guessoum, and K. Moulai, Neural network adaptive wavelets for sizing of stand-alone photovoltaic systems, in *Proceedings of the 2nd International IEEE Conference on Intelligent Systems*, Varna, Bulgaria, pp. 365-370, 2004.
- [9] H. Wu and X. Tao, Three phase photovoltaic grid-connected generation technology with MPPT function and voltage control, in *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, Taipei, Taiwan, pp. 1295-1300, 2009.
- [10] S. S. Deshmukh and J. M. Pearce, Electric vehicle charging potential from retail parking lot solar photovoltaic awnings, *Renewable Energy*, Vol. 169, pp. 608-617, 2021.
- [11] B. Müller, L. Hardt, A. Armbruster, K. Kiefer, and C. Reise, Yield predictions for photovoltaic power plants: Empirical validation, recent advances and remaining uncertainties, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 24, No. 4, pp. 570-583, 2015.
- [12] K. O. Uwho and H. N. Amadi, Design and simulation of 500kW grid-connected PV system for faculty of engineering, rivers state university using PVSyst software, *Iconic Research and Engineering Journals*, Vol. 5, No. 8, pp. 221-229, 2022.
- [13] D. O. Akinyele, R. K. Rayudu, and N. K. C. Nair, Life cycle impact assessment of photovoltaic power generation from crystalline silicon-based solar modules in Nigeria, *Renewable Energy*, Vol. 101, pp. 537-549, 2017.
- [14] M. Shaaban and J. O. Petinrin, Renewable energy potentials in Nigeria: Meeting rural energy needs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 72-84, 2014.
- [15] S. Changkakati, A. K. Sahu, R. Syed, S. Kumar, and J. P. Kesari, Performance evaluation of grid-connected solar photovoltaic plant using PVSyst software, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 9, No. 10, pp. 71-97, 2020.
- [16] R. Prakash and S. Singh, Designing and modelling of solar photovoltaic cell and array, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 35-40, 2016.
- [17] A. T. Brimmo, A. Sodiq, S. Sofela, and I. Kolo, Sustainable energy development in Nigeria: Wind, hydropower, geothermal and nuclear, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 74, pp. 474-490, 2017.
- [18] R. K. Akikur, R. Saidur, H. W. Ping, and K. R. Ullah, Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for off-grid rural electrification: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 27, pp. 738-752, 2013.
- [19] O. A. Ahmad, W. H. Habeeb, D. Y. Mahmood, K. A. Jalal, and H. Sayed, Design and performance analysis of 250kW grid-connected photovoltaic system in Iraqi environment using PVSyst software, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*, Vol. 7, No. 3, pp. 415-421, 2019.
- [20] F. Umer, M. S. Aslam, M. S. Rabbani, M. J. Hanif, N. Naeem, and M. T. Abbas, Design and optimization of solar carport canopies for maximum power generation and efficiency at Bahawalpur, *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2019, 2019.
- [21] A. Iringová and M. Kovacic, Design and optimization of photovoltaic systems in a parking garage: A case study, *Transportation Research Procedia*, Vol. 55, pp. 1171-1179, 2021.



شکل 16 نمودار بازگشت سرمایه و نقطه سر به سر پروژه در 5 سال ابتدایی

#### 4- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی علمی و عملی برای انتخاب بهینه تعداد اجزای اصلی نیروگاه‌های فتوولتائیک (پنل و اینورتر)، با توجه به سطح دسترسی معلوم و خاص (سقف پارکینگ) و با در نظر گرفتن قیود حاکم بر اجزای نیروگاه نظیر ولتاژ و توان خروجی ماژول، محدوده ولتاژ و جریان ورودی اینورتر، پیشنهاد شده است.

با توجه به شرایط خاص سازه پارکینگ‌های موجود (سه پارکینگ) و نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزار PVSyst، شیب بهینه ۳۰ درجه و زاویه جهت‌گیری ۱۲ درجه برای پنل‌ها، با فاصله ۱.۰۲ متر بین ردیف‌ها، بر خلاف شرایط ایده‌آل انتخاب شده‌اند. پنل‌های تأمین شده برای نیروگاه، پنل‌های ۲۰۰ وات از برند چینی (YL200P-35b) هستند. با توجه به اینکه عرض پنل‌ها ۰.۹۹ متر است، سه ردیف ۵ تایی از پنل‌ها بر روی هر کدام از مربع‌های  $۵.۰۸ \times ۵.۰۸$  متر قرار گرفتند. با این روش چینش، تعداد ۶۳ پنل بر روی پارکینگ شماره ۱، ۷۵ پنل بر روی پارکینگ شماره ۲، و ۱۱۴ پنل بر روی پارکینگ شماره ۳ و در مجموع ۲۵۲ پنل بر روی پارکینگ‌ها قرار گرفتند. بنابراین، امکان نصب ۲۵۲ پنل ۲۰۰ وات و رساندن ظرفیت پارکینگ خورشیدی به ۵۰.۴ کیلووات پیک فراهم آمد. خروجی سالانه چین پارکینگ خورشیدی حدود ۸۰ مگاوات‌ساعت برآورد شده است. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار SMA Sunny Design، تعداد و ظرفیت بهینه اینورترها انتخاب گردید و سازگاری آن‌ها با پنل‌ها و آرایه‌های متصل به آن‌ها سنجیده شد. از محاسبات اقتصادی، دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۵ سال به دست آمد و نشان داد که اندکی پس از ۴ سال، پروژه وارد سوددهی خواهد شد.

#### 5- مراجع

- [1] A. H. Mirzahassemi and T. Taheri, Environmental, technical and financial feasibility study of solar power plants by RETScreen, according to the targeting of energy subsidies in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 5, pp. 2806-2811, 2012.
- [2] H. Gunerhan and A. Hepbasli, Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications, *Building and Environment*, Vol. 42, No. 2, pp. 779-783, 2007.
- [3] M. Mnasri and A. St. Leger, Stand Alone photovoltaic solar power generation system: A case study for a remote location in Tunisia, in *Proceedings of the IEEE PES General Meeting*, Minneapolis, MN, USA, pp. 1-4, 2010.

- [22] A. Singh, S. S. Shaha, P. G. Nikhil, Y. R. Sekhar, S. Saboor, and A. Ghosh, Design and analysis of a solar-powered electric vehicle charging station for Indian cities, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 12, No. 3, 2021.
- [23] Y. Elhenawy, G. Hafez, S. Abdel-Hamid, and M. Elbany, Prediction and assessment of automated lifting system performance for multistorey parking lots powered by solar energy, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 266, p. 121859, 2020.
- [24] P. Nunes, R. Figueiredo, and M. C. Brito, The use of parking lots to solar-charge electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 66, pp. 679–693, 2016.
- [25] M. Meratizaman, S. Monadzadeh, and M. Amidpour, Simulation, economic and environmental evaluations of green solar parking (refueling station) for fuel cell vehicle, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 5, pp. 2359–2373, 2014.
- [26] H. Hosseinnia and B. Tousi, Optimal operation of DG-based microgrid (MG) by considering demand response program (DRP), *Electrical Power Systems Research*, Vol. 167, pp. 252–260, 2019.
- [27] H. Mokhtarzadeh Khaneghahi and Sh. Gorjian, Design, simulation, and analysis of a solar carport: Case study: The parking lot of Tarbiat Modares University, Faculty of Agriculture, *Energy Engineering and Management*, Vol. 13, No. 3, pp. 128–143, 2023. (in Persian)
- [28] W. Brooks and J. Dunlop, *Photovoltaic Installer Resource Guide*, North American Board of Certified Energy Practitioners, 162p, 2012.
- [29] M. Goudarzi, *Solar radiation map in Iran/radiation potential of different parts of Iran*, Accessed 11 September 2016; barghnews.com/fa/news/17483. (in Persian)
- [30] G. Najafi, B. Ghobadian, R. Mamat, T. Yusaf, and W. Azmi, Solar energy in Iran: Current state and outlook, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, pp. 931–942, 2015.
- [31] R. Zahedi, S. Gitifar, and A. Ahmadi, Technical-economic feasibility of designing a 10 MW solar power plant of Kavir Tire Company in Birjand city of South Khorasan province using RET Screen software, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 10, No. 2, pp. 134–148, 2023.
- [32] H. Molavi and S. H. Dariabary, *Design of Photovoltaic Systems*, pp. 30–45, Karaj: Pardis, 2022. (in Persian)
- [33] F. Allahverdi and F. Samani, *Planning and Installing Photovoltaic Systems*, pp. 192–231, Tehran: Niaz-e-Danesh, 2021. (in Persian)