The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems

Online ISSN: 2980-8693

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Modeling the Required Energy Supply in the Frozan Area of Bandar Abbas Using Solar Panels Installed On the Roofs of Buildings

Majid Zarezdeh

Department of Energy and Environment, Iranian National Standard Organization, Bandar Abbas, Iran. Email: majid_zarezdeh_nu@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 14 February 2023
Revised 16 March 2023
Accepted 14 April 2023
Published Online 27 December 2023

Keywords:
ArcGIS,
Bandar Abbas,
feasibility,
roof installation,
PVSol, solar panel,
Technical-economic evaluation.

ABSTRACT

The Forozan area of Bandar Abbas is one of the growing areas. Due to the increase in the population in this part, the amount of electricity consumed in the Forozan region has also increased. Considering the style of the structures in this area, the suitable skyline, and the gentle slope towards the south, the buildings have a good potential for installing solar panels, and the possibility of using their produced energy is an effective method of compensating part of the energy. It is required by the region. After the field monitoring of the area, calculating the digital height of the area relative to the base, using ArcGIS software, the topology of the area, the slope, and the skyline have been calculated and interpolated. Modeling has been done for these areas using PVSol software version 2021 with how to install panels in south-direction and east-west directions. By using these panels on the roofs of the buildings in this area, which were technically possible to install, they will produce about 9800-kilowatt hours of energy annually, and after 5 years, the capital of this project will be returned. In the case of covering all the buildings that can be installed in the Forozan area of Bandar Abbas, more than 7.9 MWh of energy will be produced annually and the production of more than 450 tons of CO_2 gas will be prevented. The installation of the panel will provide 20% of the electricity consumed in the area.

Cite this article: Zarezdeh, M. (2023). Modeling the Required Energy Supply in the Frozan Area of Bandar Abbas Using Solar Panels Installed On the Roofs of Buildings. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 2 (3), 215-235. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.372473.1051

© Majid Zarezdeh. **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.372473.1051

1. Introduction

The problem of energy crisis is considered one of the basic problems of the present century. This issue has caused special attention to be paid to the use of renewable energies. With the increase in the urban population and the need to provide housing, water, energy, and other services in urban areas has increased significantly. This has led to more energy consumption and the same amount of pollution in big cities [1]. One of the new methods in the countries is the requirement to install solar panels on buildings for builders of apartments and residential complexes. The roof of existing buildings in urban areas is a very suitable potential for installing solar panels and receiving renewable energy in urban areas [2].

2. Material and Method

Feasibility studies for the construction and installation of solar panels in power plants or installation on the roofs of buildings and canals include the following [5]:

- The production capacity of the plan,
- Calculating the amount of radiation in the area, climatic conditions, and environmental conditions,

- Evaluation of the amount of shading of structures and the topology of the area,
- Evaluation of the type of module and panel suitable for the region,
- Predicting the output gain of the panel.
- Economic model,

3. Results and Discussion

The difference in the number of panels installed on the roof in different areas, as well as the number of available converters, is due to the limitation in the space installed on the roof of the buildings. The type of layout also affects the covered space. The performance ratio in the east-west arrangement of solar panels on the roof is higher than in the south-south mode, and this can be attributed to the decrease in performance due to shading in this type of structure. Calculating the performance ratio in different months of the year is an important factor that will show how solar panels installed on the roof with different orientations will perform. The movement of the monthly pattern in both installation modes is almost the same. The peak of production capacity is in May and June and its minimum is estimated in December and January.

4. Conclusions

The low amount of shading in Forozan area and the presence of a similar height in the structures of this area have led to an increase in the efficiency of solar panels installed on the roofs of buildings in this area. Due to the limited space available on the roof of the buildings, most of the installed panels will have a power of about 5 kilowatts. In the south-facing installation mode and due to the space limitation and the possibility of shading the panels on each other at some hours of the day or days of the year, they have a lower performance factor than the east-west orientation. Based on the modeling calculations, the total amount of energy produced by these panels in south-Direction is about 9.500.00 kilowatt hours per year, and in east-west mode are 9.700.00 kilowatt hours per year. This arrangement in Forozan area compensates for about 20% of the electricity needed in the area during the year and is an effective help in improving the stability of the electricity grid, especially in the hot seasons of the year and peak consumption.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

مدل‌سازی تأمین انرژی مورد نیاز منطقهٔ فروزان بندرعباس با استفاده از پانل‌های خورشیدی نصب‌شده روی بام ساختمان‌ها

مجید زارع‌زاده

دکتری هیدرولوژی دریا، بخش انرژی و محیط زیست، سازمان ملی استاندارد، بندرعباس، ایران. رایانامه: majid_zarezadeh_nu@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۰۶

کلیدواژه:
ارزیابی فنی-اقتصادی،
امکان‌سنجی،
بندرعباس،
پانل خورشیدی،
نصب بر بام،
ArcGIS،
PVSol.

چکیده

منطقهٔ فروزان بندرعباس از جمله مناطق در حال رشد بوده و عمدهٔ ساختمان‌های این منطقه آپارتمان نوساز با ارتفاع تقریباً یکسان هستند. به علت افزایش جمعیت در این بخش، میزان برق مصرفی نیز در منطقهٔ فروزان روندی صعودی دارد و این روند با ایجاد مناطق تجاری و بازارهای بزرگ در این منطقه ملموس‌تر شده است. با توجه به سبک سازه‌ها در این منطقه و خط آسمان مناسب، شیب ملایم نسبت به جنوب، ساختمان‌ها پتانسیل مناسبی برای نصب پانل‌های خورشیدی داشته و امکان استفاده از انرژی تولیدی آن‌ها روشی مؤثر در جبران بخشی از انرژی مورد نیاز منطقه است. پس از پایش میدانی منطقه و محاسبهٔ ارتفاع رقومی منطقه نسبت به مبنا، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS توپولوژی منطقه، شیب زمین، خط آسمان محاسبه و درون‌یابی شده است. با استفاده از نرم‌افزار PVSol نسخهٔ ۲۰۲۱ نصب پانل خورشیدی به صورت جنوب‌سو و شرق-غرب، روی بام ساختمان‌های این منطقه مدل‌سازی شده است. نتایج نشان داده با نصب پانل‌ها روی سقف ساختمان‌های این منطقه که امکان نصب را از لحاظ فنی داشتند، سالیانه حدود۹۸۰۰ کیلووات انرژی تولید کرده و پس از ۵ سال سرمایه این پروژه برگشت داده خواهد شد. در صورت پوشش کلیهٔ ساختمان‌های دارای قابلیت نصب در منطقهٔ فروزان بندرعباس، سالیانه بیش از ۹/۷ MWh انرژی تولید شده و از تولید بیش از ۴۵۰ تن گاز CO_2 جلوگیری خواهد شد. نصب پانل موجب تأمین ۲۰ درصد از برق مصرفی منطقه خواهد بود و به تأمین انرژی الکتریکی پایدار در این منطقه کمک خواهد کرد.

استناد: زارع‌زاده، مجید (۱۴۰۲). مدل‌سازی تأمین انرژی مورد نیاز منطقهٔ فروزان بندرعباس با استفاده از پانل‌های خورشیدی نصب‌شده روی بام ساختمان‌ها. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۲ (۳) ۲۱۵-۲۳۵. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.372473.1051

© مجید زارع‌زاده.
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.372473.1051

۱. مقدمه

مسئلهٔ بحران انرژی به عنوان یکی از معضلات اساسی قرن حاضر به شمار می‌آید. این موضوع سبب شده توجه ویژه‌ای به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر شود. با افزایش جمعیت شهری و نیاز به تأمین مسکن، آب، انرژی و سایر خدمات در مناطق شهری به شکل چشمگیری افزایش یافته است. فرهنگ آپارتمان‌نشینی و الزام این‌گونه ساخت‌وساز در مناطق شهری نیز به افزایش محسوس افراد ساکن در مناطق شهری منجر شده است. برآوردهای آماری نشان می‌دهند در سال ۲۰۵۰ میلادی حدود ۸۶ درصد از جمعیت ایران ساکن شهرها خواهند بود [۱]. تولید انرژی نقش کلیدی در توسعه دارد و امروزه کشورها برای رهایی از مضرات انرژی ناشی از سوخت‌های فسیلی به سوی توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر رو آورده‌اند، طوری که ۲/۸ درصد از کل نیاز انرژی دنیا را این نوع از انرژی‌ها تأمین می‌کنند. بر اساس آمار آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر[1] تا سال ۲۰۲۲ انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع مهم انرژی تجدیدپذیر مطرح است و امروزه کشورهای توسعه‌یافته برای تأمین نیازهای خود به این منبع روی آورده‌اند. بر اساس داده‌های مرکز ملی آمار ایران و ترازنامهٔ انرژی وزارت نیرو، تا سال ۱۴۰۰ میزان تولید انرژی‌های تجدیدشونده در مجموع باد، خورشید و زیست‌توده و ژئومتریک به ۴۲۰ مگاوات رسیده که با توجه به تولید و نیاز ۷۰ هزار مگاواتی کشور به انرژی، رقم زیادی نیست. یکی از روش‌های نوین در کشورها، الزام به نصب پانل‌های خورشیدی روی ساختمان‌ها برای سازندگان انبوه‌ساز آپارتمان و مجتمع‌های مسکونی است. به نقل از آژانس مناطع طبیعی و انرژی ژاپن[2]، طبق مقررات جدیدی که از ۱۵ دسامبر ۲۰۲۳ توسط مجمع محلی پایتخت ژاپن تصویب شد، تمام خانه‌های جدید در توکیو که بعد از آوریل ۲۰۲۵ توسط انبوه‌سازان ساخته شود، باید به پانل‌های خورشیدی مجهز باشند. کمیسیون انرژی ایالت کالیفرنیا[3]، استانداردها و الزامات انرژی جدیدی را در این ایالت به تصویب رسانده است که به موجب آن از سال ۲۰۲۰ به بعد ملزم به نصب صفحات خورشیدی شده‌اند. با توجه به اینکه روزهای گرم و آفتابی در کالیفرنیا بسیار زیاد است، اجرای طرح یادشده در این ایالت منطقی و به‌صرفه است. مجلس نمایندگان برلین[4] به‌تازگی قانون جدیدی موسوم به قانون خورشیدی برلین[5] را تصویب کرده که این قانون نصب سامانه‌های خورشیدی در برلین از سال ۲۰۲۳ الزامی کرده، بنابراین از سال ۲۰۲۳ نصب سامانه‌های خورشیدی فتوولتائیک روی ساختمان‌های جدید در پایتخت آلمان اجباری می‌شود. براساس مقررات الزام نصب سامانه‌های خورشیدی در برلین از سال ۲۰۲۳، هرکس از این الزامات سرپیچی کند تا ۵ هزار یورو جریمه خواهد شد. برای ساختمان‌های با چندین خانوار این جریمه به حداکثر ۲۵ هزار یورو افزایش می‌یابد.

بر اساس تحقیقات میدانی و آمایش داده‌های ماهواره‌ای و به کمک مدل‌سازی با سری‌های زمانی، شهر بندرعباس از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۵ بیش از ۱۵ درصد اراضی این شهر از بایر به ساختمان تبدیل شده‌اند. به‌ویژه این تغییرات در شرق شهر بندرعباس بیشتر بوده است [۲]. بر اساس نقشهٔ پیش‌بینی سال ۲۰۲۵، بیشترین رشد شهر در شمال شرق و جنوب غرب است [۳]. با گسترش و توسعهٔ شهر بندرعباس و افزایش جمعیت، بلندمرتبه‌سازی به شکل چشمگیری افزایش یافته تا راه حلی برای رفع چالش افزایش جمعیت باشد. رشد عمودی شهر بندرعباس با توجه به اهداف توسعهٔ پایدار شهری مطرح شده است. بر همین اساس و با توجه به رشد عمودی و یکسان این شهر، بام ساختمان‌های موجود در این مناطق پتانسیل بسیار مناسب برای نصب پانل‌های خورشیدی و دریافت انرژی تجدیدپذیر در محدودهٔ شهری است [۴]. شرایط اقلیمی و میزان تابش در استان هرمزگان و شهر بندرعباس یکی از قوت‌های این شهر است که بیش از ۳۰۰ روز خورشیدی و در بازهٔ زمانی حدود ۸ تا ۱۰ ساعت طی هر روز امکان اخذ انرژی از تابش خورشیدی را دارد [۵]. این قابلیت و مزیت نسبی در شهر بندرعباس علاوه بر مبحث فنی، از لحاظ اقتصادی نیز به‌صرفه است. بر اساس پژوهش‌های صورت‌گرفته، نصب پانل خورشیدی در مناطق با اقلیم گرم و خشک و نیمه‌خشک فرایندی اقتصادی است و برگشت سرمایه و هزینه‌های ناشی از نصب پانل‌های خورشیدی روی بام ساختمان‌های این مناطق بین ۴ تا ۸ سال است [۶].

1. International Renewable Energy Agency(IRENA)
2. Agency for Natural Resources and Energy(ANRE)
3. California Energy Commission
4. Berlin House of Representatives
5. Berlin Solar Act

به این‌منظور با پایش شرایط موجود در شهر بندرعباس و بررسی امکان‌سنجی مناطق مختلف این شهر، ضمن ارائهٔ پارامترهای مؤثر، با وزن‌دهی این پارامترها، منطقهٔ مناسب انتخاب و شبیه‌سازی نصب پانل خورشیدی روی بام این ساختمان‌ها انجام شده است. پس از انجام محاسبات فنی، به منظور برآورد آثار اقتصادی و زیست‌محیطی، با استفاده از نرم‌افزار RETScreen، پایش مربوطه انجام پذیرفته است (شکل ۱).

شکل ۱. فرایند مرتبط با انجام تحقیق و پژوهش

۲. پیشینهٔ تحقیق

به منظور بررسی موارد مشابه و تحقیقات انجام‌شده در حوزهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر، برخی پژوهش‌های صورت‌گرفته در چند سال گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. طی پژوهشی در کشور تایلند با اقلیمی گرم و مرطوب و بارندگی زیاد، تحقیقات در مورد عملکرد فنی و اقتصادی نصب پانل‌های خورشیدی روی بام ساختمان‌های مسکونی صورت پذیرفته است. بر این اساس، شبیه‌سازی نصب پانل خورشیدی روی ساختمان ۸ طبقه در شهر بانکوک انجام شد که نتایج آن نشان داد میانگین انرژی تولیدی سالیانه ناشی از این طراحی ۸۰۷/۷۱ kWh است. از نظر اقتصادی، سیستم خورشیدی فتوولتائیک نصب‌شده بر بام دارای پارامتر اقتصادی جذاب با دورهٔ بازپرداخت ۹/۷۲ ساله و ارزش IRR ۱۰/۱۰ درصد است [۷]. پژوهشی دیگر در قبرس شمالی، پتانسیل نصب پانل‌های خورشیدی و تولید برق از بام ساختمان بیمارستان دانشگاه، که یکی از ساختمان‌های بزرگ دانشگاه بود، انجام شده است. بر اساس داده‌های میدانی و سامانهٔ PVGIS، نتایج نشان داده که میزان تابش مناسب در گسترهٔ ۲۰۳۵/۹ kWh/m^2– ۱۸۴۳/۸ است. نتایج این پژوهش نشان داده زاویهٔ بهینهٔ نصب پانل خورشیدی ۳۵ درجه و در راستای جنوب‌سو دارای بیشترین عملکرد تولید انرژی از پانل‌های نصب‌شده است [۸]. پژوهش انجام‌شده برای نصب پانل‌های خورشیدی روی منازل در کشور عراق نشان داده که امکان تولید ۲۴ kWp انرژی تجدیدپذیر در سال وجود داشته و با افزایش سطح مساحت ساختمان‌های مسکونی و تجاری، مقدار هزینهٔ ترازشده ۱۰/۲۹ $c/kWh خواهد شد [۹]. در کشور ویتنام برای تولید انرژی برق، سیستم نصب پانل تجمیعی روی پنجره‌های ساختمان به جای سقف آن مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰]. سازمان ملل در برنامه‌های جهانی اهداف توسعهٔ پایدار[1] روی تأمین آب و انرژی پایدار تأکید دارد. بر این اساس و برای تأمین انرژی پایدار تجدیدپذیر، با استفاده از فناوری‌های جدید و سازه‌های سبک دارای پانل خورشیدی نصب‌شده بر بام در کشورهای اوگاندا و اندونزی بررسی شده است. نتایج تحقیق روی ۵ نوع سیستم متفاوت فتوولتائیک با مبدل مناسب و زاویهٔ جهت‌گیری بهینه در کشور اوگاندا هزینهٔ ترازشده

1. Sustainable Development Goal(SDG)

انرژی به‌دست‌آمده در محدودهٔ ۰/۲۵ $/kWh تا ۰/۳۶ $/kWh محاسبه شده و این کمیت در اندونزی در محدودهٔ ۰/۲۵ $/kWh تا ۰/۳ $/kWhتخمین زده شده است. میزان کاهش در دی‌اکسید کربن تولیدی نیز در اوگاندا و اندونزی به‌ترتیب ۱۷۳/۸۹۴ تن و ۱۲۲/۷۴۲ تن است [۱۱]. به‌رغم چالش‌های پیشروی بخش انرژی کشور اردن و لزوم استفاده از منابع تجدیدپذیر برای کاهش اثرات تغییرات آب‌وهوایی و تقاضای فزایندهٔ برق، گروهی از پژوهشگران خروجی برق و قابلیت اقتصادی نصب سیستم‌های فتوولتائیک در پشت‌بام ساختمان‌های آپارتمانی در اردن را مورد تجزیه‌وتحلیل قرار داده‌اند. به این‌منظور پژوهشگران یادشده با به‌کارگیری نرم‌افزار شبیه‌سازی Polysun برق تولیدی را تخمین زدند. به منظور برآوردهای اقتصادی و مالی از روش مقایسه‌ای ارزیابی مصرف و تولید برق، و مقایسهٔ قابلیت اقتصادی بر اساس دورهٔ بازپرداخت و شاخص‌های طرح‌های تعرفه‌های مختلف استفاده شده است. برای بررسی شرایط متفاوت، سناریوهای مختلفی بررسی شده که عبارت‌اند از: تغییر در زوایای شیب نصب پانل، زوایای آزیموت، فضای بین آرایه‌ها. نتایج این پژوهش نشان داد زاویهٔ نصب پانل ۷ درجه و آزیموت ۹۰ درجه و خرید تضمینی برق طی ۲۵ سال سناریویی موفق و بهینه برای ارائه به مشترکان خانگی در کشور اردن است [۴]. کشور ویتنام پتانسیل مناسبی برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. در پژوهشی در منطقهٔ شمال شرقی این کشور، نتایج نصب پانل‌های خورشیدی متصل به شبکه نصب‌شده روی بام ساختمان‌ها که دارای منبع باتری قابل شارژ مجدد هستند، بررسی شده است. نتایج نشان داده نصب این پانل‌ها با به‌کارگیری باتری قابل شارژ، و بدون آن نسبت هزینه به سود بزرگ‌تر از یک را دارند و هزینهٔ برگشت سرمایه و مقدار ارزش خالص فعلی هر دو مثبت هستند. در مجموع سیستم نصب پانل‌های خورشیدی روی بام بدون داشتن باتری‌های قابل شارژ، دارای منفعت اقتصادی بیشتری در این منطقه بودند [۱۲]. در کنار استفاده از سقف منازل مسکونی، مجتمع‌های تجاری و کارخانه‌ها، می‌توان با نصب پانل‌های خورشیدی روی کانال‌ها و مخازن آب نیز برای تولید برق به کار برد. محوطه‌های و حوضچه‌های پرورش میگو در کشور تایوان برای بررسی امکان‌سنجی تولید انرژی تجدیدپذیر با استفاده از قرار دادن پانل خورشیدی بررسی شده است. بر اساس این پژوهش با قرار دادن ۸۹۶ پانل خورشیدی روی مخازن، حدود ۳۲MWh برق به شکل میانگین ماهیانه تولید شده است [۱۳].

در ایران نیز روی تحقیقات و پژوهش‌هایی در این زمینه صورت پذیرفته است. در پژوهشی سه طرح متفاوت از سیستم فتوولتائیک به روش نصب BIPV بر سطح جانبی ساختمان با مساحتی حدود ۵۰۵۰ متر مربع، و یک طرح سیستم فتوولتائیک نصب‌شده بر پشت‌بام با مساحتی حدود ۲۲۷۸ مترمربع، در یک شهرک مسکونی در شهر تهران شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که سیستم یکپارچه با پانل منوکریستال بیشترین میزان برق تزریقی به شبکهٔ ۸۷۱/۲ MWh/year تخمین زده شده است. همچنین بر اساس نتایج این پژوهش، زمان برگشت هزینه‌های سرمایه‌گذاری در این طرح ۳/۹۷ سال است [۱۴]. در پژوهشی دیگر، امکان‌سنجی به‌کارگیری از ساختمان‌ها و زمین‌های بایر در محیط‌های آموزشی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین برای نصب پانل خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس این پژوهش در مقیاس مزارع خورشید بهره‌گیری از سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی GIS متداول است. اما در مقیاس کوچک روش تحلیل سلسله‌مراتبی می‌تواند تمایز مناسبی برای انتخاب زمین مناسب ایجاد کند. زمین مناسب در درجهٔ اول با توجه شیب (حدود ۳ تا ۵ درصد) می‌تواند برای این نیروگاه انتخاب شود [۱۵]. بهره‌گیری از انرژی خورشیدی برای رسیدن به شهرهای پایدار و قابل سکونت در سطوح پشت‌بام ساختمان‌های ناحیهٔ ۲ منطقهٔ ۸ شهر مشهد بررسی شده است. نتایج پژوهش یادشده نشان داده است از مجموع ۶۲۳ قطعه ارزیابی‌شده در محدودهٔ مورد مطالعه، حدود ۱۹ هزار متر مربع از فضای پشت‌بام‌ها در بهترین شرایط برای نصب صفحات خورشیدی بوده و پتانسیل بسیار مناسبی برای این منطقهٔ پرمصرف در تأمین برق مصرفی داشته است [۱۶].

با توجه به پژوهش‌های مشابه صورت‌گرفته و نیاز ضروری شهر بندرعباس و منطقهٔ پرتراکم به انرژی الکتریکی، در این پژوهش با بررسی میدانی و مناطق متفاوت در شهر بندرعباس و با استفاده از تکنیک‌های امکان‌سنجی تعیین مکان در نرم‌افزار ArcGIS منطقهٔ مناسب انتخاب شده است. در این رویه با استفاده از عوامل تأثیرگذار نظیر توپولوژی منطقه، میزان سایه‌اندازی، بررسی خط آسمان در منطقه و... میزان سایه‌اندازی سایه‌ها روی یکدیگر شبیه‌سازی شده و در انتها برآوردی از میزان انرژی تولیدی برای نصب پانل‌های خورشیدی تخمین زده شده است. لذا می‌توان گفت که برای دستیابی به یک فرایند هدفمند و با

چشم‌انداز مناسب برای تأمین پایدار انرژی و جلوگیری از اثرات نامطلوب زیست‌محیطی، در حوزهٔ طراحی شهری و شهرسازی، توجه به طراحی مناسب و متناسب با شرایط اقلیمی و میزان نوردهی با هدف استفادهٔ بهینه از نور طی روز برای روشنایی و همچنین استفاده از میزان تابش مناسب برای تولیدی انرژی تجدیدپذیر خورشیدی دارای اهمیت چشمگیری است.

۳. روش انجام پژوهش

مهم‌ترین بخش هر پژوهش، به‌ویژه پژوهش‌های مرتبط با حوزه‌های صنعتی و اجتماعی، مباحث امکان‌سنجی و بررسی‌های علمی و عملی در مورد انجام پروژه است. بررسی و امکان‌سنجی علمی و بر اساس پژوهش‌های به‌روز و عملیاتی، به کاهش هزینه‌های طرح و کاهش اشتباه‌ها در انجام فرایند منجر خواهد شد. عموماً بررسی‌های امکان‌سنجی برای ساخت و بنا نهادن پانل‌های خورشیدی در نیروگاه‌ها و یا نصب روی سقف بام ساختمان‌ها و کانال‌ها، شامل موارد زیر است [۱۷]:

- میزان توان تولیدی طرح؛
- محاسبهٔ میزان تابش منطقه، شرایط اقلیمی، و شرایط زیست‌محیطی؛
- ارزیابی میزان سایه‌اندازی سازه‌ها و توپولوژی منطقه؛
- ارزیابی نوع ماژول و پانل مناسب برای منطقه؛
- پیش‌بینی بهرهٔ خروجی پانل؛
- مدل اقتصادی.

۳. ۱. بررسی مناطق مختلف شهر و انتخاب موقعیت مناسب

عامل مهم در مبحث مکان‌یابی بررسی عوامل تأثیرگذار در تعیین مکان مناسب و وزن‌دهی به این پارامترها است. مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در نصب پانل خورشیدی روی بام ساختمان عبارت‌اند از [۱۸ و ۱۹]:

- توپولوژی مسطح منطقه؛
- وجود خط آسمان با شیب مناسب؛
- همترازی سطح سازه‌ها؛
- وجود مساحت لازم برای نصب سازه و پانل؛
- موقعیت اداری شهری و توزیع برق.

بر این اساس با تعیین ضریب اهمیت هر یک از این عوامل و تلفیق آن‌ها با سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی ArcGIS، می‌توان زمین‌ها و موقعیت‌های مناسب‌تر را شناسایی کرد. به این‌منظور، برای هر یک از این عوامل ضریب اهمیت تعیین می‌شود، که به روش دودویی است. در این روش معیارها مقایسه می‌شوند و درجهٔ اهمیت هر معیار نسبت به دیگری مشخص خواهد شد [۲۰ و ۲۱]. سپس از روش AHP[1] در نرم‌افزار ArcGIS در چهار مرحلهٔ زیر انجام شده است:

- تهیهٔ نقشه‌های زمین‌مرجع‌شده با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و وزن‌دهی پارامترهای مؤثر؛
- به‌کارگیری تکنیک‌های AHP برای تعیین اهمیت نسبی و اولویت وزن هر معیار؛
- ارزیابی کلی مکان‌های انتخاب‌شده با به‌کارگیری حاصل‌جمع رویه پوششی به وسیلهٔ ابزارهای ArcGIS؛
- در نهایت، سایت‌های غیرقابل اجرای تولیدشده در مرحلهٔ اول از مناطق بالقوه برای انتخاب سایت فتوولتائیک خورشیدی حذف می‌شوند.

بر این‌اساس، اولین عامل قرار گرفتن مناطق در یک حوزهٔ منطقهٔ شهرداری و زیرمجموعهٔ یک بخش توزیع برق شهری است. عامل دیگر و اساسی که به‌ویژه در عملکرد توان خروجی تأثیرگذار است، وضعیت توپولوژی و ارتفاع ساختمان‌ها در این مناطق است [۱۹]. وضعیت شیب زمین مناطق نیز عامل دیگری است که تأثیر زیادی بر میزان تابش مؤثر روی سازه‌ها و بام

1. Analytic Hierarchy Process

آن‌ها دارد. در انتها نحوهٔ شهرسازی و وجود مجتمع‌های بلندمرتبه و آپارتمان‌ها با خط آسمان حدودی یکسان نیز باید مد نظر قرار داده شود. از آنجا که طرح در محدودهٔ شهر بندرعباس است، دیگر عوامل نظیر شرایط اقلیمی، میزان تابش، آلایندگی و... در کل محدوده یکسان است و نیازی به ورود آن‌ها به مبحث مکان‌نمایی و امکان‌سنجی نیست [۵].

به این‌منظور شهر بندرعباس به ۱۰ منطقه با شرایط مشابه بیان‌شده تقسیم شده و به وزن‌دهی به عوامل تأثیرگذار پرداخته شده است (شکل ۲). عامل خط آسمان و همسطح بودن وضعیت ارتفاع بنا و سازه‌ها ضریب ۴، قرار گرفتن در یک منطقهٔ شهرداری و شرکت توزیع برق ضریب ۴، توپولوژی منطقه و شیب نسبت به ارتفاع مبنا ۲، کمینهٔ اختلاف ارتفاع بین سازه‌ها و وجود ساختمان‌های با کاربری متفاوت ۲، نوع بافت شهری ۲، نحوهٔ قرارگیری سازه‌ها نسبت به یکدیگر و ساختار دسترسی خیابان و کوچه‌ها ۱. به این‌منظور مناطق ۱۰گانه مورد پایش قرار گرفت. بر اساس پایش انجام‌شده، مناطق ۱ تا ۳ دارای بافت پیچیده و چیدمان تجاری و مسکونی و عمدتاً منازل سازمانی دستگاه‌های اجرایی متفاوت بوده است. مناطق ۵ و ۷ عمدتاً مناطق تجاری و بازار هستند. منطقهٔ ۴ بافت فرسودهٔ شهر و عمدتاً دارای ساختمان‌های مسکونی ویلایی است. منطقهٔ ۱۰ در نزدیکی فرودگاه بندرعباس است و عموماً در چنین مکانی به علت احتمال انعکاس نور خورشید به تجهیزات ناوبری و برج مراقبت، موقعیت مناسبی برای نصب نیست. از میان دیگر مناطق، منطقهٔ ۸ بیشترین امتیاز ممکن را دارد و لذا این منطقه برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. برای استفادهٔ بهینه از مدل‌سازی انجام‌شده و کاهش عدم قطعیت نتایج خروجی، فرایند تنها روی بخشی از منطقهٔ ۸ انجام شد که دارای سازه بود و در بخش‌هایی که پردیس دانشگاه و یا زمین‌های مسطح در حال واگذاری بخش غربی این منطقه شبیه‌سازی نصب پانل خورشیدی صورت نپذیرفته است. دوباره و به منظور رفع ایرادهای فنی و کنترل مناسب روی فرایند شبیه‌سازی، منطقهٔ انتخاب‌شده به ۸ بخش تقسیم شده و شبیه‌سازی نصب پانل خورشیدی روی بام این مناطق به شکل مجزا و با دو سناریوی بیان‌شده انجام پذیرفته است. علت تفکیک مناطق موجود در شبیه‌سازی به سبب محدودیت در نصب تعداد پانل در هر مرحله شبیه‌سازی، جلوگیری از ایجاد خطا حین اجرای برنامه به علت حجم گرافیکی و محاسباتی زیاد و همچنین محدودیت تعداد عارضهٔ موجود در اجرای مدل‌سازی، است. علاوه بر این، با تفکیک مناطق امکان پایش و تحلیل دقیق‌تر و ناحیه‌به‌ناحیه صورت پذیرد و بر اساس با قدرت تفکیک‌پذیری جغرافیایی مناسب‌تری می‌توان داده‌های خروجی را به دست آورد. این ۸ منطقه در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

۳. ۲. تحلیل وضعیت ساختاری منطقهٔ مورد بررسی

به منظور بررسی وضعیت آماری منطقهٔ انتخاب‌شده در شهر بندرعباس، از قابلیت جدول‌های توصیفی نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است. منطقهٔ فروزان با مساحتی حدود ۴۶۶ هزار متر مربع، در محدودهٔ جغرافیایی شمال‌ـ جنوب ۲۷ درجه و ۱۲ دقیقه و ۳۷ ثانیه تا ۲۷ درجه و ۱۱ دقیقه و ۴۷ ثانیه بوده و از محدودهٔ شرق‌ـ غرب ۵۶ درجه و ۱۲ دقیقه و ۲۳ ثانیه تا ۵۶ درجه ۲۰ دقیقه و ۴۶ ثانیه قرار دارد (جدول ۱).

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی محل انتخاب‌شده برای شبیه‌سازی خروجی نرم‌افزار ArcGIS

موقعیت	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
نقطهٔ ۱	۵۶° ۲۰' ۱۱٫۴۰"	۲۷° ۱۲' ۳۷٫۲۷"
نقطهٔ ۲	۵۶° ۲۰' ۲۳٫۷۷"	۲۷° ۱۱' ۴۷٫۲۹"
نقطهٔ ۳	۵۶° ۱۹' ۵۶٫۴۰"	۲۷° ۱۲' ۱۸٫۸۶"
نقطهٔ ۴	۵۶° ۲۰' ۴۶٫۲۲"	۲۷° ۱۲' ۱۲٫۳۶"

شکل ۲. تقسیم مناطق شهر بندرعباس برای انتخاب موقعیت مناسب شبیه‌سازی برگرفته از Google Earth

شکل ۳. تقسیم‌بندی منطقهٔ فروزان بندرعباس به ۸ منطقهٔ مجزا برگرفته از Google Earth

بر اساس پایگاه دادهٔ شهرداری بندرعباس، مساحت منطقهٔ فروزان حدود ۳ درصد کل مساحت شهر بندرعباس است، اما به علت وجود مجتمع‌های مسکونی و آپارتمان در این منطقه، بیش از ۷ درصد از جمعیت شهر بندرعباس در این بخش ساکن هستند. وجود پردیس دانشگاه و مجتمع‌های تجاری و همچنین فضاهای آموزشی در این منطقه، میزان مصرف انرژی را در این منطقه به شکل محسوسی افزایش داده است (جدول ۲). مهم است که اطلاعات و دانش مناسبی از وضعیت توپولوژی و ارتفاع مبنا در منطقهٔ مورد بررسی تهیه شود. با استفاده از این داده‌ها می‌توان خط آسمان[1] در منطقه را برآورد کرد و با توجه به شیب سازه‌ها به سمت جنوب، در مورد نحوهٔ استقرار پانل‌های خورشیدی و بررسی امکان نصب آن‌ها اطلاعاتی به دست آورد [۲۲ـ۲۴]. به این‌منظور ارتفاع رقومی۷۲۷۰ نقطه در منطقهٔ مورد مطالعه به دست آمد. ارتفاع و اطلاعات دیگر نقاط این منطقه با استفاده از روش درون‌یابی فاصلهٔ وزنی معکوس[2] (IDW) به دست آمده است (شکل ۴). بر اساس داده‌های میدانی و همچنین خروجی درون‌یابی و طراحی نقشهٔ شیب نقاط مبنا در منطقهٔ فروزان بندرعباس، شیب ساختمان‌ها به از شمال به جنوب کاهش یافته و همین امر منجر به اطمینان از جلوگیری اثر سایه‌اندازی سازه‌ها روی بام یکدیگر خواهند بود.

1. Skyline
2. Inverse distance Weighting

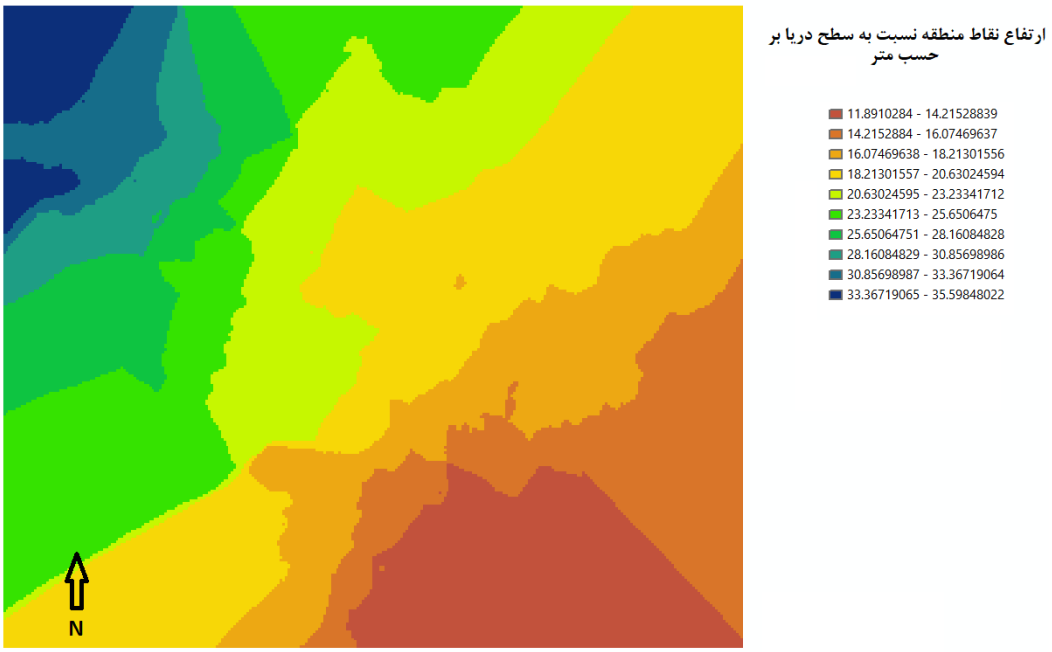
جدول ۲. میزان درصد کاربری فضاها در منطقهٔ فروزان بندرعباس بر اساس تحلیل جدول‌های توصیفی نرم‌افزار ArcGIS

ردیف	نوع کاربری	درصد کاربری ساختمان‌ها٪
۱	مسکونی	۶۴
۲	تجاری	۲۲
۳	آموزشی	۸
۴	ورزشی و تفریحی	۴
۵	سایر	۲

با توجه به نحوهٔ شهرسازی در این منطقه، وجود کوچه‌ها و خیابان‌های ۱۲ متری بین ساختمان‌ها و آپارتمان‌های موجود در دو سوی هر خیابان، امکان سایه‌اندازی سازه روی سقف سازهٔ جانبی و یا روبه‌رو وجود ندارد. بر اساس برآورد انجام‌شده، ۸۵ درصد از سازه‌ها و ساختمان‌های موجود در منطقهٔ فروزان بندرعباس، اثر سایه‌اندازی روی یکدیگر ندارند و تنها ۱۵ درصد تحت تأثیر اثر سایه‌اندازی هستند که عمدهٔ علت آن ساختمان‌های ویلایی در حداکثر یک یا سه طبقه با کاربری آموزشی، تفریحی و...، و یا تعداد معدودی ساختمان از بافت قدیمی در این منطقه است. لذا با توجه به این موارد، منطقهٔ فروزان قابلیت بسیار مناسبی برای نصب پانل خورشیدی روی بام ساختمان دارد.

۳. ۳. بررسی میزان سایه‌اندازی

مهم‌ترین موضوع در افزایش کارکرد پانل‌های خورشیدی، پس از اطمینان از اقلیم منطقه و میزان تابش خورشید و ابرناکی، بررسی وضعیت سایه‌اندازی روی پانل‌ها است. هنگام نصب پانل خورشیدی دو حالت وجود دارد که به سایه‌اندازی روی پانل‌ها منجر می‌شود، یکی اثر سایه سازه‌ها و ارتفاعات طبیعی نظیر تپه، درخت و.. بوده و دیگری احتمال سایه‌اندازی پانل‌های همجوار به علت اشتباه در نحوهٔ نصب و یا محاسبات اشتباه است. اقلیم منطقه در پژوهش‌های متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته و عمدهٔ این تحقیقات نشان داده است که میزان ابرناکی، تابش خورشیدی، مقدار مواد آلاینده و غبار در هوا و...، شهر بندرعباس برای نصب پانل خورشیدی دارای شرایط مناسبی است [۲، ۵، ۲۵ و ۲۶].



شکل ٤. ارتفاع نقاط در ساختمان‌ها در منطقهٔ مورد مطالعه برگرفته از داده‌های DEM منطقه

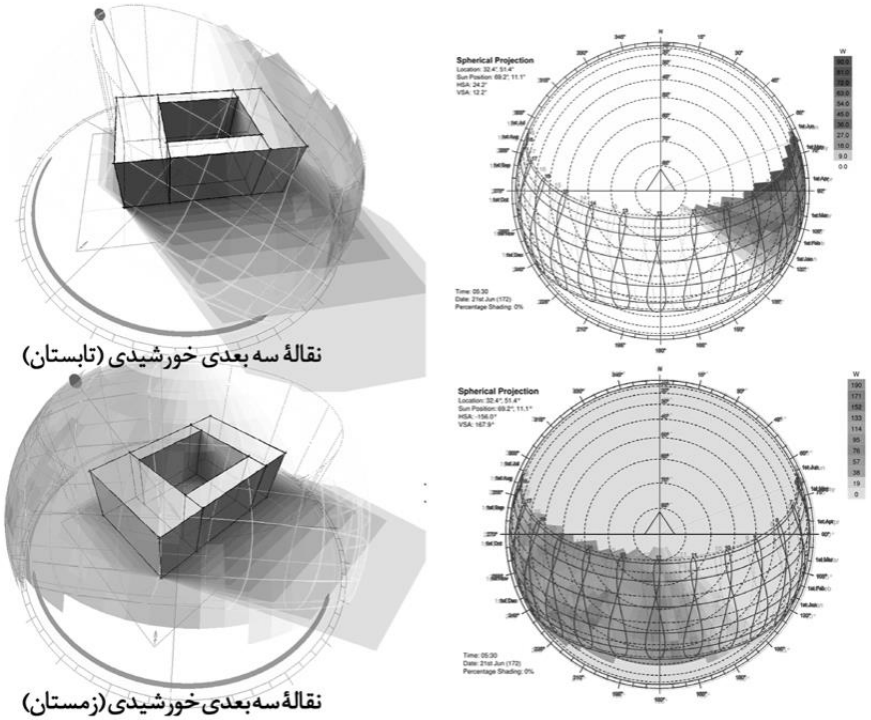
منطقهٔ فروزان در بندرعباس از مناطق رو به توسعهٔ شهری و با نرخ ساخت‌وساز بالا، به‌ویژه آپارتمان‌های مسکونی و مجتمع‌های تجاری، بوده که تراکم جمعیتی در این منطقه نیاز به انرژی برق را به شکل چشمگیری افزایش داده است (شکل ۱). مزیت این منطقه برای نصب پانل‌های خورشیدی روی بام ساختمان‌ها، وجود ساختمان‌های نوساز و دارای ارتفاع تقریبی یکسان و همچنین شیب بسیار جزئی منطقه نسبت به جنوب است که این امر به افزایش عملکرد پانل‌های خورشیدی و بهبود کیفیت فرایند منجر خواهد شد.

به این‌منظور ابتدا داده‌های ارتفاع رقومی منطقه با قدرت تفکیک مناسب در ابعاد ۱۰m در ۱۰m به شکل میدانی اخذ شده و برای نقاطی که امکان اخذ داده‌ها نبوده از روش درون‌یابی و نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است. سایه‌اندازی به عوامل متفاوتی بستگی دارد. یکی از این عوامل تأثیرگذار، ارتفاع ساختمان‌ها است که سایهٔ آن روی بافت مجاور قرار می‌گیرد. همچنین فاصلهٔ بین ساختمان‌ها عامل مؤثر دیگر در این امر است [۲۷]. برای جلوگیری از اثر سایه‌اندازی و کاهش این اثر، باید فاصلهٔ بین ساختمان‌ها بیش از طول سایه زمستانی باشد. باید به این نکته اشاره کرد که زاویهٔ تابش نیز به عرض جغرافیایی منطقه وابسته است (شکل ۵).

۳. ۴. مدل‌سازی نصب پانل‌های خورشیدی روی بام

به منظور شبیه‌سازی فرایند از نرم‌افزار PVSol نسخهٔ ۲۰۲۱ استفاده شده است. این نرم‌افزار صحه‌گذاری شده است و بر اساس تحقیقات و پژوهش‌های صورت‌گرفته و مقایسه با داده‌های میدانی، دارای عدم قطعیت کوچک و دقت زیادی است [۲۸-۳۲]. سناریوهای شبیه‌سازی براساس نحوهٔ جهت‌گیری پانل‌های خورشیدی است. سناریوی اول نصب پانل خورشیدی با جهت‌گیری به سمت جنوب و سناریوی دوم نصب پانل خورشیدی شرق- غرب، است.

بر اساس گزارش‌های فنی، تجهیزات مورد نیاز برای پانل روی بام ساختمان عبارت‌اند از [۳۳]: ماژول پانل خورشیدی، مبدل، نگهدارندهٔ سازه[1]، سنجندهٔ میزان انرژی[2]، جعبهٔ اتصال آرایهٔ ماژول‌ها، کابل، جعبهٔ توزیع AC و DC، باتری، کنترل‌کنندهٔ شارژر[3]، فیوز.



شکل ۵. بررسی اثر سایه‌اندازی در فصل‌های تابستان و زمستان [۲۷]

1. Module Mounting Structure
2. Energy Meter
3. Charge Controller

البته بستگی به نوع کار، کیفیت فرایند، نوع اقلیم منطقه، میزان هزینه و سرمایه موجود و...، امکان نصب تجهیزات دیگری مانند چاه ارت، کلیدهای بریکر، فیوزهای حفاظ جان و... نیز وجود دارد. به منظور یکسان‌سازی فرایند، جلوگیری از خطاهای احتمالی، همچنین کاهش عدم قطعیت نتایج و افزایش صحت نتایج شبیه‌سازی، کلیهٔ پانل‌ها و مبدل‌ها از یک مدل انتخاب شده‌اند. مشخصات فنی این تجهیزات در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

با توجه به اینکه وسعت منطقهٔ مورد بررسی بزرگ بوده و سازه‌های مستقر در آن با یکدیگر اثر پوششی و سایه‌اندازی نداشته باشند، و همچنین با توجه به کاهش زمان اجرای شبیه‌سازی، منطقه به ۷ قسمت تقسیم شده و شبیه‌سازی هر یک از مناطق به شکل جداگانه انجام و در انتها با یکدیگر انطباق داده شده است. نمایی از شبیه‌سازی پانل‌های نصب‌شدهٔ شیب‌دار جنوب‌سو در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

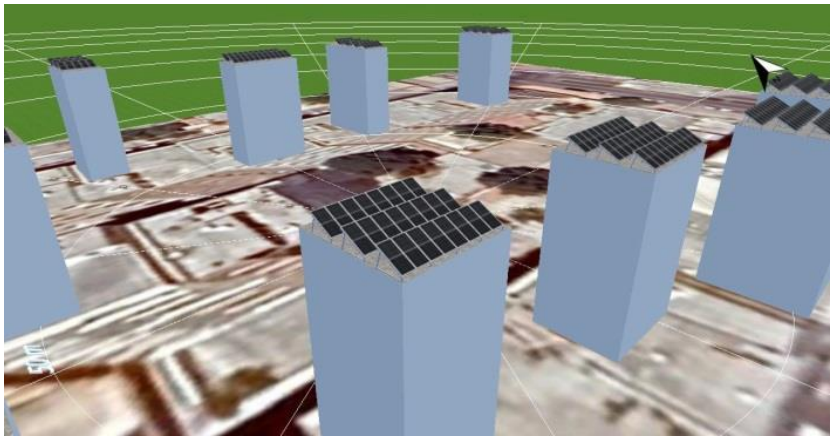
جدول ۳. مشخصات فنی پانل‌های خورشیدی به‌کاررفته در شبیه‌سازی [۳۴]

ردیف	مشخصهٔ نوعی	مقدار کمیت
۱	ولتاژ نقطهٔ بیشینهٔ توان	۴۵٫۷۷ ولت
۲	شدت جریان نقطهٔ بیشینهٔ توان	۱۳٫۳۳ آمپر
۳	توان اسمی	۶۱۰ وات
۴	بهرهٔ اسمی	٪۲۱٫۸۳
۵	ابعاد	۲۴۶۵mm ×۱۱۳۴mm
۶	بیشینهٔ ولتاژ	۱۵۰۰ ولت
۷	ضریب افت ولتاژ به دما	%/k −۰/۲۴۶

جدول ٤. مشخصات فنی مبدل‌های به‌کاررفته در شبیه‌سازی [۳۴]

ردیف	مشخصهٔ نوعی	مقدار کمیت
۱	بیشینهٔ توان DC	۱۵Kw
۲	ولتاژ اسمی DC	۶۲۰ ولت
۳	بیشینهٔ شدت جریان ورودی	۲۵ آمپر
۴	بیشینهٔ شدت جریان در هر نقطهٔ توان	۱۲٫۵ آمپر
۵	بیشینهٔ نقطهٔ توان	۱۰Kw
۶	بیشینهٔ ولتاژ در هر نقطهٔ توان	۸۵۰ ولت

شکل ٦. نمای بالا از شبیه‌سازی نصب پانل روی بام ساختمان خروجی از نرم‌افزار PVSol



شکل ۷. نمای افقی از شبیه‌سازی نصب پانل‌های خورشیدی روی بام ساختمان خروجی از نرم‌افزار PVSol

به منظور جلوگیری از اثر سایه‌اندازی[1] پانل‌ها روی یکدیگر، و در نتیجه کاهش توان خروجی، فاصلهٔ بین پانل‌ها باید به گونه‌ای تعیین شود که کمترین میزان سایه‌اندازی روی دهد و هم‌زمان این فاصله نباید به اندازه‌ای باشد که موجب افزایش مساحت مورد نیاز و در نتیجه، افزایش مقدار کابل، زیرساخت و هزینه‌های ساخت شود [۱۴]. برای تعیین فاصلهٔ بهینهٔ بین پانل‌ها (D)، سه پارامتر دیگر مورد نیاز است، H عرض پانل است، برای آرایش عمودی H برابر با طول ضلع بزرگ‌تر پانل و در آرایش افقی برابر ضلع کوچک‌تر است. دو پارامتر دیگر یکی عبارت است از: زاویهٔ نصب پانل نسبت به سطح افق (θ) و دیگری زاویهٔ تابش خورشید (α) است. تعیین α از طریق منحنی‌های مسیر خورشید انجام می‌شود. در نهایت فاصلهٔ بین پانل‌ها از رابطهٔ ۱ تعیین می‌شود [۳۵]:

$$D = \sin(\alpha+\theta)\times {H}/{\sin(\alpha)} \qquad (۱)$$

زاویهٔ α در واقع زاویهٔ ارتفاع خورشید نسبت به زمین است. این زاویه در عرض‌های جغرافیایی مختلف و فصل‌های مختلف سال متفاوت است. برای محاسبهٔ آن از منحنی‌های دوبعدی مسیر حرکت خورشید استفاده می‌شود. چنانچه مشخص است کمترین زاویه خورشید طی سال مربوط به اواخر ماه آذر و اوایل دی ماه و بیشترین آن مربوط به خرداد است. با توجه به ابعاد و مشخصات جغرافیایی منطقه و همچنین مسیر خورشید در موقعیت مورد مطالعه، فاصلهٔ مناسب بین پانل‌ها حدود ۵/۶ متر به دست آمده است (جدول ۵). به منظور استفادهٔ بهینه از فضا و افزایش توان خروجی در فرایند شبیه‌سازی، در هر آرایه دو پانل به صورت افقی قرار داده شده است.

برای محاسبهٔ تابش پخش از الگوریتم هافمن[2] استفاده شده که رابطهٔ آن به شکل زیر است (رابطهٔ ۲) [۳۵]:

$$E_{clear} = 0.78E_{ext}\sin(\gamma_s)^{1.15} \qquad (۲)$$

که در آن γ_S ارتفاع خورشید، E_{ext} تابش فرازمینی است. با استفاده از الگوریتم هی و دیویس[3] برای معادلات تابش سطح به دست می‌آید [۳۶]:

$$A_i = \frac{DNI}{E_a} \qquad (۳)$$

که در آن DNI تابش مستقیم متعامد و E_a میزان تابش روی زمین است. متناسب با شرایط تابش پانل‌ها و مبدل‌های[4] با توان خروجی متناسب و بهینه در شبیه‌سازی انتخاب شده است. بر اساس پایش انجام‌شده برای اثر سایه‌اندازی در ساختمان‌های منطقهٔ فروزان بندرعباس، به منظور اخذ توان خروجی بهینه، مناسب و به‌صرفه، از پانل‌های خورشیدی نصب‌شده روی بام ساختمان، ۷۰ درصد از منطقه قابلیت نصب مناسب را داشته و حدود ۳۰ درصد به علت آثار سایه‌اندازی کامل و یا نسبی روی پانل‌ها، توان خروجی میزان مناسبی نبوده و از لحاظ اقتصادی نیز به‌صرفه نیست.

1. Shading
2. Hoffmann
3. Hey & Davies
4. Inverter

جدول ۵. مشخصات موقعیت محل نصب برای تعیین فاصلهٔ بهینهٔ بین پانل‌ها

مشخصه	مقدار
زاویهٔ α	۴۱ درجه
زاویهٔ θ	۲۶٫۹ درجه
تعداد پانل در هر آرایه	۲
ارتفاع پانل H	۱۳۰۳ میلی‌متر

اولین بخش از شبیه‌سازی، ایجاد مدل‌های ساختمان و منطقه بر اساس ارتفاع رقومی اخذشدهٔ میدانی و خروجی درون‌یابی نرم‌افزار ArcGIS است. به این‌منظور هر یک از مناطق هشتگانهٔ مجزا به شکل تفکیک‌شده برآورد و به عنوان سازه در بخش مربوطه در نرم‌افزار PVSol تعریف می‌شود. نحوهٔ چیدمان و تعیین مکان دقیق سازه‌ها مطابق با فرایند زمین‌مرجع[1] تعریف‌شده در نرم‌افزار ArcGIS صورت پذیرفته است. هر چه میزان دقت و صحت در این بخش بیشتر باشد، خروجی نهایی، به‌ویژه در بخش اثر سایه‌اندازی و همچنین ضریب عملکرد[2] توان خروجی پانل‌های خورشیدی با واقعیت انطباق بیشتری خواهد داشت.

پس از ورود کلیهٔ اطلاعات مربوط به سازه‌ها و توپولوژی منطقه، اقدام به شبیه‌سازی نصب پانل‌های خورشیدی، مبدل و سایر ملزومات مورد نیاز با دو سناریوی متفاوت پرداخته شده است. به منظور جلوگیری از ایجاد خطاهای احتمالی در اجرای نهایی برنامهٔ شبیه‌سازی، کلیهٔ پانل‌های خورشیدی و مبدل‌ها دارای نوع و ویژگی فنی یکسانی هستند که اطلاعات مربوط به آن‌ها در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

۴. نتایج

در انتهای فرایند شبیه‌سازی ابتدا داده‌های خروجی نرم‌افزار PVSol مورد پایش قرار داده می‌شود. این پایش به منظور اطمینان از صحت نتایج خروجی، و نبود دادهٔ خروجی پرت در میان آن‌ها است. با توجه به اینکه شبیه‌سازی در ۸ منطقهٔ متفاوت و با ۲ سناریوی متفاوت انجام شده است، که برای هریک از مناطق داده‌های خروجی و مساحت مؤثری که بام ساختمان‌ها توسط پانل‌های خورشیدی اشغال شده، با استفاده از جدول‌های توصیفی[3] در نرم‌افزار ArcGIS مساحت اشغال‌شده در جدول ۶ ارائه شده است.

بر اساس محاسبات جدول‌های توصیفی ArcGIS موجود در جدول ۶، در بخش ۵ منطقهٔ فروزان بیشترین میزان مساحت نصب نسبت به فضای اصلی را دارد و منطقهٔ ۷ کمترین نسبت را داشته است. منطقهٔ ۷ به علت قرار گرفتن در نزدیکی پردیس دانشگاه و زمین‌های خالی بوده و لذا نسبت مساحت پانل به کل مساحت کمترین مقدار است و منطقهٔ ۵ در فروزان بیشترین تعداد ساختمان و حجم تراکم بالایی دارد. در مجموع از کل مساحت ممکن در این منطقه ۳/۱۳ درصد از سقف‌ها در شبیه‌سازی برای نصب پانل به کار گرفته شده است.

جدول ٦. مساحت مؤثر فضای اشغال‌شده در نصب پانل‌های خورشیدی خروجی جدول‌های توصیفی نرم‌افزار ArcGIS

نام منطقه	مساحت منطقه (m^2)	مساحت پوشش‌داده‌شده با پانل‌های خورشیدی (m^2)	درصد پوشش مساحت (٪)
بخش ۱	۱۳۱۰۱۹	۴۵۶۷	۳٫۴۹
بخش ۲	۲۱۸۴۲۰	۶۹۴۱	۳٫۱۸
بخش ۳	۹۵۷۲۰	۱۳۹۸	۱٫۴۶
بخش ۴	۷۱۵۳۳	۲۹۱۹	۴٫۰۸
بخش ۵	۱۳۸۴۵۹	۷۴۷۲	۵٫۴۰
بخش ۶	۱۱۲۳۷۶	۲۲۳۶	۱٫۹۹
بخش ۷	۱۵۳۷۰۵	۵۱۴	۰٫۳۳
بخش ۸	۸۵۷۹۸	۱۳۶۴	۱٫۵۹
مساحت کل منطقه	۸۷۶۰۱۱	۲۷۴۱۱	۳٫۱۳

1. Geo-Reference
2. Performance Ratio
3. Attribute Table

با توجه به نسبت مساحت پوشش‌داده‌شده توسط پانل‌های خورشیدی روی بام ساختمان‌ها در مناطق هشت‌گانهٔ منطقهٔ فروزان بندرعباس، تعداد پانل‌ها و مبدل‌های هر منطقه متفاوت است. همچنین تعداد این تجهیزات به نحوهٔ چیدمان پانل‌ها نیز بستگی دارد (جدول ۷).

جدول ۷. تعداد پانل و مبدل به‌کاررفته در پشت‌بام مناطق هشت‌گانه

نام منطقه	تعداد پانل در جهت‌گیری جنوب‌سوی پانل	تعداد پانل در جهت‌گیری شرق‌ـ غرب پانل	تعداد مبدل در جهت‌گیری جنوب‌سوی پانل	تعداد مبدل در جهت‌گیری شرق‌ـ غرب پانل
بخش ۱	۱۶۳۴	۱۶۵۰	۷۳	۱۲۴
بخش ۲	۲۴۸۳	۲۲۸۰	۱۲۰	۱۱۴
بخش ۳	۵۵۰	۵۰۰	۲۵	۵۰
بخش ۴	۱۰۴۴	۱۰۲۴	۷۸	۶۴
بخش ۵	۲۶۷۳	۲۵۹۲	۲۴۳	۱۶۲
بخش ۶	۸۰۰	۶۰۰	۵۰	۱۰۰
بخش ۷	۱۸۴	۱۸۴	۲۳	۴۶
بخش ۸	۴۸۸	۴۸۸	۴۱	۶۱

اختلاف در تعداد پانل‌های نصب‌شده روی بام در مناطق متفاوت و همچنین تعداد مبدل‌های موجود، به علت محدودیت در فضای نصب‌شده روی بام ساختمان‌ها است. نوع چیدمان فضای تحت پوشش را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به اطلاعات موجود در جدول ۷ و تنوع تعداد پانل‌های نصب‌شده، نکتهٔ مهم بررسی وضعیت میزان توان تولیدی، ضریب عملکرد پانل‌های خورشیدی و دیگر پارامترهای مؤثر در بهرهٔ خروجی مناطق متفاوت و جهت‌گیری‌های مختلف است.

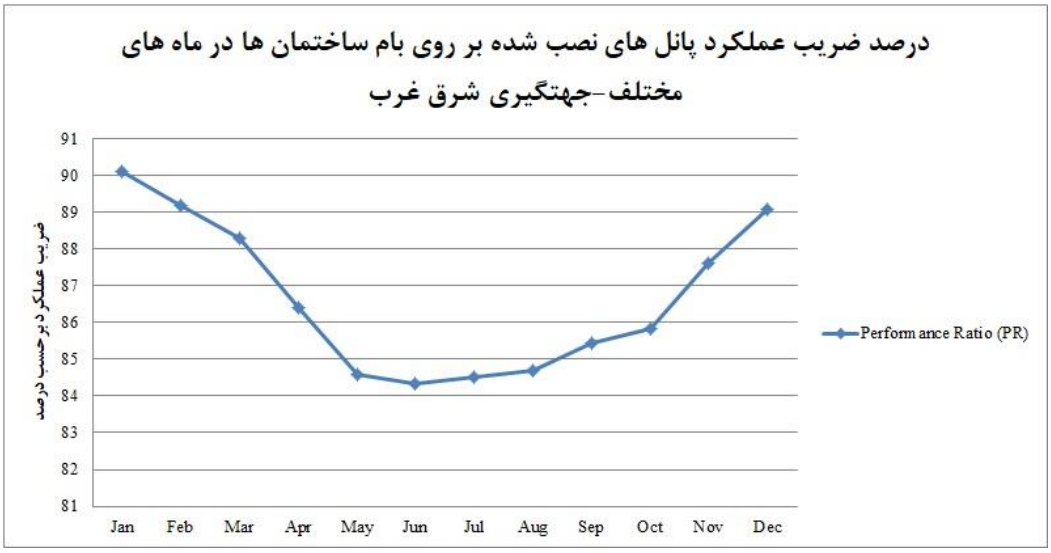
جدول ۸. پارامترهای مؤثر بر توان تولیدی نحوهٔ نصب پانل روی بام با جهت‌گیری جنوب‌سو

نام منطقه	انرژی تولیدی‌شده (kWh)	توان تولیدی ماژول‌های نصب‌شده (kw_p)	نسبت بهرهٔ سالیانه (kwh/kw_p)	نسبت عملکرد (٪)	کاهش بهره به علت اثر سایه‌اندازی (درصد در سال)
بخش ۱	۱۷۴۷۲۶۰	۹۹۶٫۷۴	۱۷۵۲٫۵۶	۸۳٫۳	۳٫۷
بخش ۲	۲۲۹۵۰۹۵	۱۵۱۴٫۶۳	۱۵۱۴٫۷۵	۷۴٫۱	۱۴٫۸
بخش ۳	۵۰۸۴۵۰	۳۳۵٫۵	۱۵۱۵٫۳۳	۷۴٫۶	۱۴٫۷
بخش ۴	۹۶۱۸۴۷	۶۳۶٫۸۴	۱۵۰۴٫۳۰	۷۳٫۶	۱۵٫۲
بخش ۵	۲۴۷۷۹۴۲	۱۶۳۰٫۵۳	۱۵۱۸٫۲۸	۷۴٫۳	۱۴٫۴
بخش ۶	۷۵۱۵۸۱	۴۸۸	۱۵۳۹٫۸۹	۷۵٫۴	۱۳٫۳
بخش ۷	۱۹۸۷۶۷	۱۱۲٫۲۴	۱۷۶۸٫۹۴	۸۶٫۶	۰٫۱
بخش ۸	۵۲۷۰۵۳	۲۹۷٫۶۸	۱۷۶۸٫۵۷	۸۶٫۶	۰٫۱

جدول ۹. پارامترهای مؤثر بر توان تولیدی نحوهٔ نصب پانل روی بام با جهت‌گیری شرق‌ـ غرب‌سو

نام منطقه	انرژی تولیدی‌شده (kWh)	توان تولیدی ماژول‌های نصب‌شده (kw_p)	نسبت بهرهٔ سالیانه (kwh/kw_p)	نسبت عملکرد (٪)	کاهش بهره به علت اثر سایه‌اندازی (درصد در سال)
بخش ۱	۱۷۲۸۴۳۴	۱۰۰۶٫۵	۱۷۱۵٫۶۹	۸۶٫۳	۰٫۵
بخش ۲	۲۴۰۵۹۱۶	۱۳۹۰٫۸	۱۷۲۹٫۷۰	۸۶٫۹	۰٫۳
بخش ۳	۵۲۳۲۹۸	۳۰۵	۱۷۱۴٫۱۶	۸۶٫۲	۰٫۴
بخش ۴	۱۰۷۶۲۷۷	۶۲۴٫۶۴	۱۷۲۲٫۸۰	۸۶٫۶	۰٫۴
بخش ۵	۲۷۲۵۳۶۹	۱۵۸۱٫۱۲	۱۷۲۳٫۴۶	۸۶٫۶	۰٫۳
بخش ۶	۶۲۴۸۲۰	۳۶۶	۱۷۰۵٫۹۲	۸۵٫۸	۰٫۱
بخش ۷	۱۹۲۶۳۹	۱۱۲٫۲۴	۱۷۱۵٫۱۶	۸۶٫۲	۰٫۱
بخش ۸	۵۱۰۹۰۵	۲۹۷٫۶۸	۱۷۱۵٫۱۳	۸۶٫۲	۰٫۱

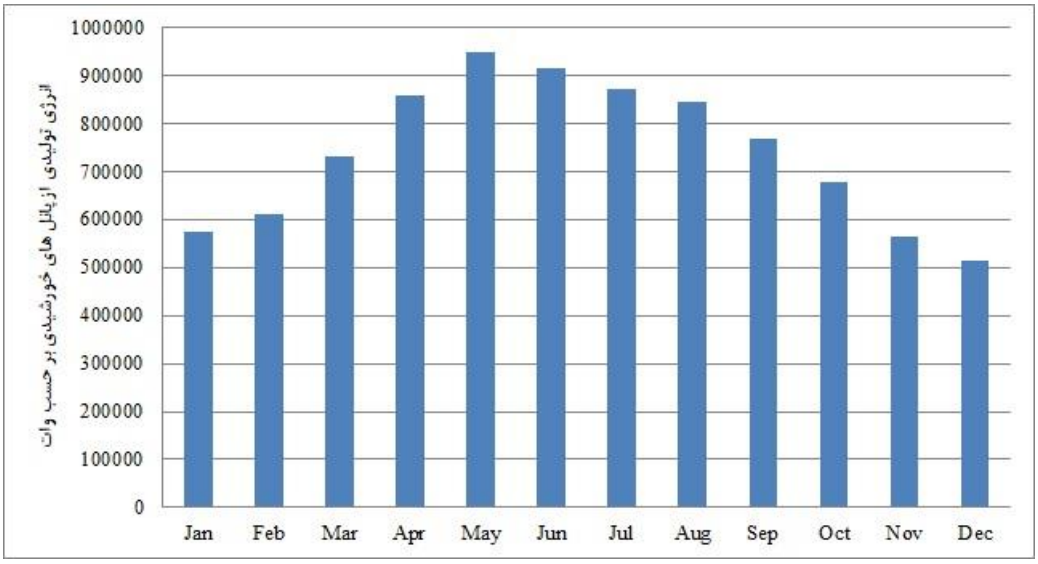
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نسبت عملکرد در نحوهٔ چیدمان شرق- غرب پانل‌های خورشیدی روی بام نسبت به حالت جنوب‌سو بیشتر است و این را می‌توان در کاهش عملکرد به علت سایه‌اندازی در این نوع سازه نسبت داد. محاسبهٔ نسبت عملکرد در ماه‌های متفاوت سال عامل مهمی است که نشان خواهد داد نحوهٔ عملکرد پانل‌های خورشیدی نصب‌شده روی بام با جهت‌گیری‌های مختلف چگونه خواهند بود.



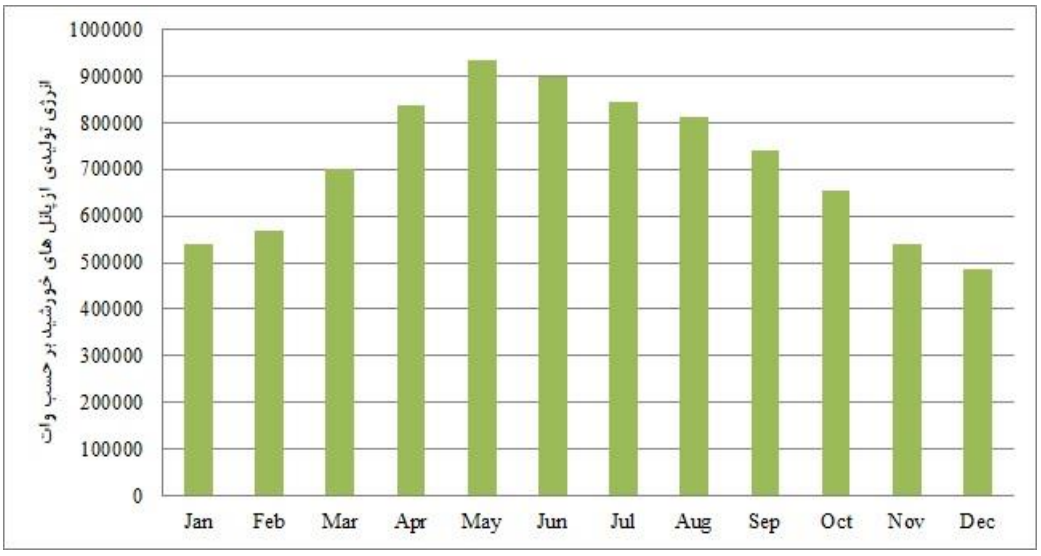
شکل ۸. ضریب عملکرد پانل‌های نصب‌شده در ماه‌های مختلف سال با جهت‌گیری شرق- غرب خروجی نرم‌افزار PVSol

شکل ۹. ضریب عملکرد پانل‌های نصب‌شده در ماه‌های مختلف سال با جهت‌گیری جنوب خروجی نرم‌افزار PVSol

میزان انرژی تولیدی ماهیانهٔ مناطق هشت‌گانهٔ منطقهٔ فروزان بندرعباس در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. نحوهٔ حرکت الگوی ماهیانه در هر دو حالت نصب تقریباً مشابه است. اوج توان تولیدی در اردیبهشت و خرداد است و کمینهٔ آن در آذر و دی تخمین زده شده است.



شکل ۱۰. انرژی تولیدی ماهیانه از پانل‌های نصب‌شده در جهت‌گیری جنوب‌سوی خروجی نرم‌افزار PVSol



شکل ۱۱. انرژی تولیدی ماهیانه از پانل‌های نصب‌شده در جهت‌گیری شرق- غرب خروجی نرم‌افزار PVSol

در کنار جنبه‌های مرتبط با تولید انرژی، عوامل اقتصادی، عامل و شاخص نشان‌دهندهٔ میزان کاهش گازهای گلخانه‌ای مضر و CO_2 نیز عامل مهم و اثرگذاری است. هدف نهایی از ایجاد بستر برای ساخت نیروگاه‌های تجدیدپذیر، کاهش میزان مواد آلاینده است که چالشی مهم و اساسی برای سال‌های آتی است. موضوع تأمین انرژی پایدار همراه با حفظ محیط زیست و کمترین تخریب آن، در برنامه‌های سازمان ملل و توسعهٔ پایدار یونسکو جایگاه ویژه‌ای دارد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده، در هر دو حالت جهت‌گیری و سناریوهای شبیه‌سازی، با نصب این پانل‌ها بر بام ساختمان‌ها، از تولید مقدار زیادی گاز CO_2 در هوا جلوگیری خواهد شد. برای تأمین انرژی به همان میزان انرژی تولیدشده در جدول‌های ۸ و ۹ و شکل‌های ۱۰ و ۱۱، در صورت تولید این میزان از انرژی با نیروگاه‌های فسیلی بیش از ۴۵۰ تن گاز مخرب لایه ازن در سال تولید و در محیط زیست وارد خواهد شد (جدول ۱۰). برای محاسبهٔ میزان گاز Co_2 تولیدی، خروجی نرم‌افزار PVSol از جدول‌های ۸ و ۹ وارد نرم‌افزار RETScreen شده است. بر اساس توان تولیدی نیروگاه تجدیدپذیر پیشنهادی در PVSol و شرایط اقلیمی وارد نرم‌افزار RETScreen شده است. این نرم‌افزار با توجه به شرایط میزان آلایندگی برای تولیدی همان مقدار انرژی و برق با نیروگاه فسیلی مشابه برآورد شده و میزان آلایندگی ناشی از آن نیز برآورد شده است.

جدول ۱۰. میزان کاهش تولید CO_2 به ازای هر منطقه و جهت‌گیری متفاوت پانل‌های نصب‌شده روی بام

نام منطقه	میزان کاهش تولید CO_2 برای نصب پانل جنوب‌سو (kg/year)	میزان کاهش تولید CO_2 برای نصب پانل شرق‌ـ غرب (kg/year)
منطقهٔ ۱	۸۲۱۰۱۹	۸۱۱۶۱۷
منطقهٔ ۲	۱۰۷۸۳۱۶	۱۰۶۸۴۱۵
منطقهٔ ۳	۲۳۸۹۴۵	۲۱۵۸۷۸
منطقهٔ ۴	۴۵۰۲۵۸	۵۰۵۷۸۲
منطقهٔ ۵	۱۱۶۳۵۳۴	۱۲۸۰۷۵۰
منطقهٔ ۶	۳۵۳۱۸۹	۲۹۳۴۵۳
منطقهٔ ۷	۹۳۳۱۶	۹۰۴۷۹
منطقهٔ ۸	۲۴۷۴۳۹	۲۴۷۴۳۹
مجموع	۴۴۴۶۰۱۶	۴۵۱۳۸۱۳

بر اساس محاسبات مدل‌سازی انجام‌شده، در مجموع میزان انرژی تولیدی توسط این پانل‌ها در حالت جهت‌گیری جنوب‌سو حدود ۹٬۵۰۰٬۰۰ کیلووات ساعت در سال و در حالت شرق‌ـ غرب ۹٬۷۰۰٬۰۰ کیلووات ساعت در سال است. با توجه به هزینه‌های مربوطه، نرخ تنزیل و دیگر هزینه‌ها، اعتبار لازم برای نصب پانل‌های ۵ کیلووات روی بام ساختمان‌ها در سال ۱۴۰۲ حدود ۱٬۰۰۰٬۰۰۰٬۰۰۰ ریال است.

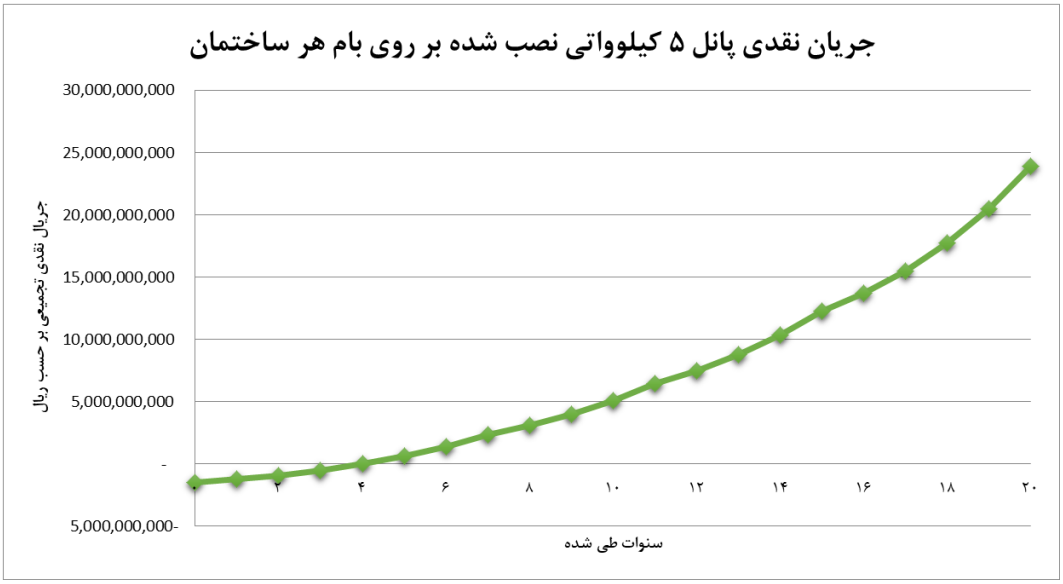
جدول ۱۱. ارزیابی اقتصادی و سرمایه‌گذاری برای هر واحد ساختمان در نصب پانل روی بام

ردیف	عنوان	واحد	مقادیر
۱	توان سیستم نصب‌شده بر بام	کیلو وات	۵
۲	مدت قرارداد خرید تضمینی برق فتوولتائیک	سال	۲۰
۳	فضای مورد نیاز	متر مربع	۲۵
۴	تولید سالیانهٔ انرژی	kwh	۹۸۶۸
۵	هزینهٔ ثابت سرمایه‌گذاری	ریال	۱٬۰۰۰٬۰۰۰٬۰۰۰
۶	درآمد ناخالص سالیانه در سال اول	ریال	۱۷۲٬۶۹۰٬۰۰۰

برگشت هزینهٔ سرمایه در این فرایند حدود ۵ سال است. از آنجا که عمدهٔ مساحت مفید برای نصب پانل خورشیدی روی بام ساختمان‌های موجود در منطقهٔ فروزان حدود ۲۰ تا ۲۵ متر مربع بوده است، لذا از لحاظ فنی مجموع توان تولیدی بر این نوع بام سازه‌ها حدود kw_p ۵ است، لذا برای بررسی اقتصادی این طرح این نوع نیروگاه کوچک‌مقیاس صورت گرفته است. به منظور پایش مالی و مطابق با قیمت‌های سال جاری و همچنین هزینه‌های نصب و اجرا در استان هرمزگان، داده‌های اولیهٔ مالی برای نصب این نوع نیروگاه در جدول ۱۲ ارائه شده و مطابق با قیمت خرید تضمینی برق تجدیدپذیر خورشیدی در سال ۱۴۰۲ و همچنین سایر ضرایب نظیر ضرایب تعدیلی، ضریب خرید، تعرفه اتصال به شبکه، ضریب خرید جدید، این محاسبات صورت پذیرفته است (شکل ۱۲).

جدول ۱۲. داده‌های مالی و فنی اولیهٔ برآورد اقتصادی طرح

توان تولیدی kw	مساحت مؤثر مورد نیاز m^2	هزینهٔ ثابت سرمایه‌گذاری (ریال)	تعرفهٔ اتصال به شبکه (ریال)	ضریب تعدیل اولیه	ضریب خرید جدید
۵	۲۵	۱٬۰۰۰٬۰۰۰٬۰۰۰	۲۰۳	۱٫۴	۱



شکل ۱۲. محاسبهٔ جریان نقدی پانل ۵ کیلووات نصب‌شده روی بام سازه‌ها در منطقهٔ فروزان

۵. نتیجه‌گیری

انرژی تولیدشده با استفاده از نصب پانل‌های خورشیدی در منطقهٔ فروزان بندرعباس کمک شایانی به بهبود و ارتقای وضعیت برق مصرفی در این منطقه پرتراکم خواهد کرد. بر اساس اطلاعات اخذشده میزان مصرف برق در منطقهٔ فروزان بندرعباس در زمان اوج در تابستان ۱۵٫۵۰۰٫۰۰ کیلووات ساعت در ماه و در زمانهٔ کمینه در زمستان ۳٫۰۰٫۰۰ کیلووات ساعت در ماه در بهمن است. در مجموع نیز برق مصرفی این منطقه در سال حدود ۸۱٫۰۰۰٫۰۰۰ کیلووات ساعت است. میزان سایه‌اندازی کم در منطقهٔ فروزان و وجود ارتفاع مشابه در سازه‌های این منطقه، به افزایش کارایی پانل‌های خورشیدی نصب‌شده بر بام ساختمان‌های این منطقه منجر شده است. با توجه به محدودیت فضای موجود بر بام ساختمان‌ها، عمدهٔ پانل‌های نصب‌شده توانی حدود ۵ کیلووات خواهند داشت. در حالت نصب جنوب‌سو و به علت محدودیت فضا و امکان سایه‌اندازی پانل‌ها روی یکدیگر در برخی ساعت‌های روز و یا ایامی از سال، دارای ضریب عملکرد کمتری نسبت به جهت‌گیری شرق‌ـ غرب هستند. در فرایند مدل‌سازی انجام‌شده، در حالت نصب شرق‌ـ غرب تعداد پانل‌های نصب‌شده ۵ درصد کمتر از تعداد در حالت نصب جنوب‌سو است. از دیگر سو عملکرد محدودیت فضای بام ساختمان‌ها و عملکرد مناسب‌تر نصب شرق‌ـ غرب و همچنین پایداری سازه هنگام وزش باد، این نحوهٔ چینش و نصب را در منطقهٔ فروزان بندرعباس اقتصادی‌تر می‌کند. در حالت نصب جنوب‌سو، در برخی از ایام سال و ساعت‌های روز، اثر سایه‌اندازی پانل‌ها روی یکدیگر روی می‌دهد و همین موضوع موجب کاهش ضریب عملکرد و افزایش اثر کاهندهٔ سایه‌اندازی در این نوع نصب را دارد. ضریب عملکرد در حالت نصب شرق‌ـ غرب در کل ایام سال بیش از ۸۲ درصد است، اما در حالت نصب جنوب‌سو تا ۶۸ درصد نیز در روزهای پایانی فصل پاییز کاهش یافته که عمدهٔ علت آن همان اثر سایه‌اندازی پانل‌ها روی یکدیگر است. این چیدمان در منطقهٔ فروزان حدود ۲۰ درصد از برق مورد نیاز منطقه طی سال را جبران کرده و کمک مؤثری به بهبود پایداری برق شبکه، به‌ویژه در فصل‌های گرم سال و اوج مصرف است. لذا در این بین حتماً نیاز به شیوه‌نامه و یا استانداردهای اجباری برای نصب، مساحت مؤثر، سازه و استقامت سقف بنا در نصب پانل خورشیدی روی بام ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است که توسط محققان بخش سازه بررسی و صورت پذیرد. البته باید به این نکته اشاره کرد که علاوه بر تأمین برق از روش‌های دوستدار محیط زیست و انرژی‌های تجدیدپذیر، تغییر رویکرد و استفاده از تجهیزات با بهره‌وری انرژی مناسب‌تر، استفاده از فناوری‌های نوین در ساختمان‌سازی برای کاهش مصرف انرژی امری ضروری است و نباید با افزایش مصرف به سمت افزایش تولید انرژی و جبران کسری آن بود، بلکه با به‌کارگیری این فناوری‌ها بخش تأمین انرژی از منابع آلاینده و فسیلی را کاهش داد.

منابع

[1] Thadani H L, Go Y I. Integration of solar energy into low-cost housing for sustainable development: case study in developing countries. Heliyon. 2021; **7**(12): p. e08513.

[2] Maddahi R. Evaluation of the Quantitative Expansion of the City and Modeling of Physical Development in the Coastal Strip of Bandar Abbas. EBTP. 2020;13(49): 45-56.

[3] Komeili M. Understanding Urban Identity of Bandar Abbas. Soffeh Journal. 2008; 17(2-1), 75-80.(in persian)

[4] Qadourah J Abu. Energy and economic potential for photovoltaic systems installed on the rooftop of apartment buildings in Jordan. Results in Engineering. 2022; Vol 16: pp. 100642.

[5] Zarezadeh M. Feasibility Construction of a 4 MW PV Power Plant to Provide Sustainable Electricity to Bandar Abbas Industrial Estate. Journal of Solar Energy Research. 2023; 8(1): 1250-1263.

[6] Lou S. Life-cycle analysis of photovoltaic systems in Hong Kong. Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2017; 9: 045901.

[7] Chiradeja P, Ngaopitakkul A. Feasibility Study on Installation of Rooftop Photovoltaic System in Complied with Thailand Energy Building Code. 2020; Yogyakarta, Indonesia, E3S Web Conf, 186.

[8] Kassem Y, Gökçekuş H, Güvensoy A. Techno-Economic Feasibility of Grid-Connected Solar PV System at Near East University Hospital, Northern Cyprus. Energies. 2021; Vol 14, DOI: 10.3390/en14227627.

[9] Chisale S W. Investigation of net metering as a tool for increasing electricity access in Malawi. International Journal of Renewable Energy Technology. 2022; Vol 13(1): 66-83.

[10] Atmaja T D. Façade and Rooftop PV Installation Strategy for Building Integrated Photo Voltaic Application. Energy Procedia. 2013; Vol 32: 105-114.

[11] Thadani H, li G. Integration of Solar Energy into Low-Cost Housing for Sustainable Development: Case Study in Developing Countries. Heliyon. 2021;Vol 7: pp. e08513.

[12] Thanh T N. Study on Performance of Rooftop Solar Power Generation Combined with Battery Storage at Office Building in Northeast Region, Vietnam. Sustainability. 2021; Vol 13, DOI: 10.3390/su131911093.

[13] Imani M. Aquavoltaics Feasibility Assessment: Synergies of Solar PV Power Generation and Aquaculture Production. Water. 2023; vol 15, DOI: 10.3390/w15050987.

[14] Beiki H. Simulation and tech-economics feasibility of power generation using building integrated with photovoltaic systems. Journal of Renewable and New Energy. 2020; vol **7**(1), pp. 102-108.

[15] Medi H. Feasibility Study on Site Selection for Installing a Small Scale PV Plan. Journal of Renewable and New Energy. 2021; vol 8(1), pp. 102-112.

[16] Shirzad Z, Minaei M, Minaei F. Spatial Assessment of the Potential for Solar Panel Installation using Multi-criteria Decision-making Methods (Case Study: A Section of Zone 2 in District 8 of Mashhad Metropolitan City). Journal of Geography and Regional Development. 2019; vol 16(2), pp. 103-124.

[17] George A M. Site Selection. Utility Scale Solar Power Plants A Guide For Developers and Investors, India: International Finance Corporation*;* 2012. 55-56. 204

[18] Baghaei N, Alibaba H, Subscription C. Important Factors in Sustainable Design of Buildings with use of Solar Panels. Innovations in Geotechnical Engineering. 2021; 1(1), 9-14.

[19] Alrawi O F. Determining the influencing factors in the residential rooftop solar photovoltaic systems adoption: Evidence from a survey in Qatar. Energy Reports, 2022; vol 8, pp. 257-262.

[20] Al Garni H Z, Awasthi A. *S*olar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. Applied Energy. 2017; vol 206: pp. 1225-1240.

[21] Taoufik M, Laghlimi M, Fekri A. Land suitability analysis for solar farms exploitation using the GIS and Analytic Hierarchy Process (AHP) - a case study of Morocco. Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal. 2021; vol 24, pp. 79-96.

[22] Castro Noblejas H. A Methodological Proposal for the Analysis of Lighting the House Building Façades. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021; vol 10, DOI: 10.3390/ijgi10080536.

[23] Nielsen A, Bolding K, Trolle D. A GIS-based framework for quantifying potential shadow casts on lakes applied to a Danish lake experimental facility. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018; vol 73, pp. 746-751.

[24] Chow A, Fung A, Li S. GIS Modeling of Solar Neighborhood Potential at a Fine Spatiotemporal Resolution. Buildings. 2014; vol **4**,pp. 195–206.

[25] Sahragard N, Arianejad H, Kamangar M. Locating solar thermal power plant to provide a sustainable energy using fuzzy logic. NECjournals. 2016; vol **19**(1), pp1-8.(in persian)

[26] Akbari H, Hosseini Nezhad F S. Determining The Optimum Orientation of Vertical Building Surfaces, Based on Solar Energy Receiving in The Hot and Humid Climate (Case Study: Bandar Abbas, Bushehr and Ahwaz Cities). Journal of Iranian Architecture & Urbanism(JIAU). 2020; vol 10(2), pp. 99-112.

[27] Beheshtifar S, Abdollahi R. Simulation of Shading in Urban Neighborhoods Using GIS (Case study: Sanandaj, Adab neighborhood). Journal of Civil and Environmental Engineering. 2023; vol **52.4**(109), p p. 49-58.
[28] Milosavljević D D, Kevkić T S, Jovanović S J. Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/software based on case study. open physics. 2022; vol 20(1), pp. 431-451.
[29] Umar N, Bora B, Banerjee C. Comparison of different PV power simulation softwares: case study on performance analysis of 1 MW grid-connected PV solar power plant. International Journal of Engineering Science Invention (IJESI). 2018; Vol7(7), pp 11-24.
[30] Becker G. Energy Yields Of PV Systems - Comparison Of Simulation And Reality. Conference: 23rd EU-PVSEC, Valencia, Spain., DOI:10.4229/23rdEUPVSEC2008-4BV.1.57, 2008.
[31] González-Peña D. Photovoltaic Prediction Software: Evaluation with Real Data from Northern Spain. Applied Sciences. 2021; vol 11, DOI: 10.3390/app11115025.
[32] Mehadi A, Nishat M M, Faisal F, Bhuiyan A R H. Design Simulation and Feasibility Analysis of Bifacial Solar PV System in Marine Drive Road, Cox's Bazar. Conference: 2021 International Conference on Science & Contemporary Technologies (ICSCT), DOI:10.1109/ICSCT53883.2021.9642526, 2021.
[33] Lisell L, Watson A. Solar Ready Buildings Planning Guide, 2009, National Renewablee Energy Laboratory: USA. p. 33.
[34]https://www.jasolar.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=70.
[35] Hofmann M, Seckmeyer G. Influence of Various Irradiance Models and Their Combination on Simulation Results of Photovoltaic System. Energies. 2017; vol **10**: p. 1495.
[36] Hofmann M, Seckmeyer G. A New Model for Estimating the Diffuse Fraction of Solar Irradiance for Photovoltaic System Simulations. Energies. 2017; vol **10**: p. 248.