

Research Paper

Technical and economic study of rooftop PV system, PV window, and PCM; A case study in Ilam, IranAmir Hossein Heydari^{1*}, Ramin Haghighi Khoshkhoo²¹ Master of Science, Energy Systems Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran² Associate Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran**ARTICLE INFO****Article History:**Received 13 May 2022
Revised 15 June 2022
Accepted 10 July 2022**Keywords:**Electricity
Energy Economy
Photovoltaic Window
Phase Change Materials
Rooftop PV System**ABSTRACT**

Buildings represent the largest energy-consuming sector; thus, exploring methods to decrease energy consumption within them is of utmost importance. Two energy-generating solutions within buildings are rooftop photovoltaic (PV) systems and PV windows. Additionally, incorporating Phase Change Materials (PCM) into building walls presents an energy-saving solution. This research compares the reduction of energy consumption through PCM with electricity generation via rooftop PV systems and PV windows. Results indicate that reductions in electricity consumption for rooftop PV, PV windows, and PCM are 11.5%, 1.4%, and 2.1%, respectively. Furthermore, an economic analysis was conducted on the energy produced by the photovoltaic power plant for sale to Iran's Ministry of Energy. Findings reveal that under the condition of selling electricity, the payback period for a rooftop PV system is 6.3 years.

Introduction

Buildings consistently exhibit the highest levels of energy consumption, primarily in the form of electricity and natural gas. Electricity is a crucial energy carrier worldwide, and its production and utilization have long been sought after by humans. Regrettably, due to its inexpensiveness in Iran, electricity has not received serious attention and has caused problems for the country in recent years. Rooftop photovoltaic (PV) systems and PV windows are two methods for generating electricity within buildings. The Iranian government has implemented an incentive policy to encourage renewable energy production by guaranteeing the purchase of PV power at a rate higher than the approved price. This research aims to investigate the construction of a rooftop PV system and compare it with PV windows and Phase Change Materials (PCM) within buildings. Incorporating PCM into building walls represents a passive method for energy storage within buildings. While numerous studies have examined rooftop PV systems, PV windows, and PCM individually, this research differs from others by simultaneously analyzing these three technologies from technical

and economic perspectives through a case study to identify effective technology for reducing building energy consumption.

Materials and methods

Selecting an appropriate research method is a crucial element of any study. The primary objective of this research is to conduct a technical and economic comparison of the use of PCM, rooftop PV systems, and PV windows. To this end, a building in Ilam city was chosen as a case study and modeled using maps and information in Design Builder and PVsyst software. Figure 1 displays both the actual and modeled views of the building.

Conclusion

Results indicate that the rooftop PV system generates 30.92 MWh of electricity annually and is the most effective solution, with an 11.5% reduction in electricity consumption. PV windows produce 3.67 MWh per year and reduce building energy consumption by approximately 1.4%. PCM also decrease building electricity and gas consumption by 2.1% and 1.8%, respectively. An economic analysis of the rooftop PV system reveals that constructing a 17 kW power plant has a payback period of 6.3 years under the condition of selling electricity to the government, as shown in Figure

* Corresponding Author, Email: a.h.heydari.uok@gmail.com

2's cash flow diagram for this power plant. The analysis indicates that if the electricity generated by the power plant is utilized solely for the building's consumption, the return on investment for the power plant will not be realized within the 20-year lifespan of the project. The unaffordability of using

PV power plant electricity for building consumption is a warning regarding Iran's low electricity prices; increasing these prices could pressure building owners to reduce their electricity consumption and utilize PV power plants.



Fig. 1. The actual and simulated view of the studied building

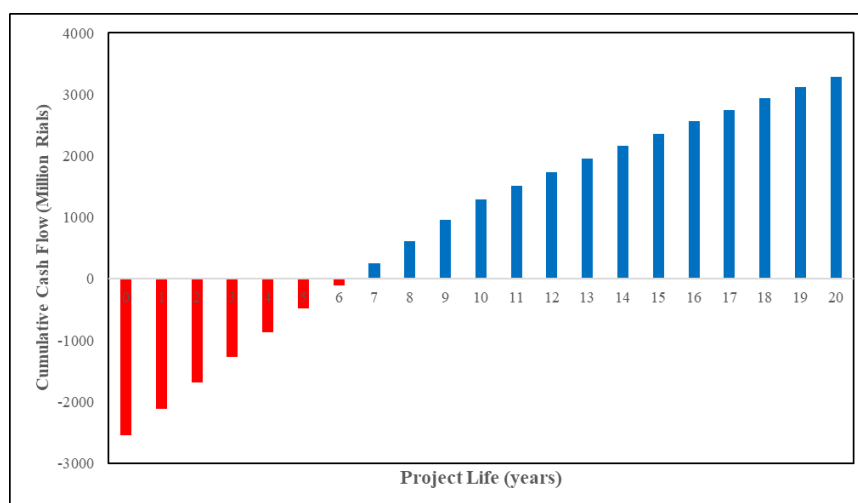


Fig. 2. Cash flow of rooftop PV system

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مقاله پژوهشی

مطالعه فنی و اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتاییک پشت‌بام، پنجره فتوولتاییک و مواد تغییرفازدهنده؛ مطالعه موردی

امیرحسین حیدری^{۱*}، رامین حقیقی‌خوشخو^۲

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی تهران

^۲ دانشیار، دانشکده مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۲/۲۳ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۳/۲۵ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۴/۲۰	ساختمان‌ها بیشترین سهم مصرف سبد انرژی کشورها را به خود اختصاص می‌دهند، بنابراین مقایسه راهکارهای مختلف کاهش‌دهنده مصرف انرژی در ساختمان‌ها بسیار راهبردی است. از راهکارهای تولید انرژی در ساختمان، استفاده از سیستم فتوولتاییک پشت‌بام و پنجره‌های فتوولتاییک است و استفاده از مواد تغییرفازدهنده در دیوارهای جانبی ساختمان جزء راهکارهای کاهش‌دهنده مصرف انرژی است. در این مقاله تولید برق با استفاده از سیستم فتوولتاییک پشت‌بام، پنجره‌های فتوولتاییک و کاهش مصرف انرژی از طریق مواد تغییرفازدهنده برای تأمین انرژی، مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد کاهش مصرف برق برای پل‌های پشت‌بام، پنجره‌های فتوولتاییک و مواد تغییرفازدهنده به ترتیب ۱۱/۵، ۱/۴ و ۲/۱ درصد است. همچنین، احداث نیروگاه پشت‌بام و مصرف انرژی الکتریکی تولیدی نیروگاه، در مقایسه با فروش انرژی به وزارت نیرو بر اساس وضعیت اقتصادی کنونی ایران و نرخ تعرفه‌های سال ۱۴۰۰ این وزارتخانه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد در شرایط فعلی احداث و فروش برق نسبت به استفاده در ساختمان توجیه اقتصادی بهتری دارد و دوره بازگشت سرمایه ۶/۳ سال حاصل می‌شود.

کلیدواژه:

مدل‌سازی عددی

اقتصاد انرژی

برق

پنجره‌های فتوولتاییک

فتوولتاییک پشت‌بام

مواد تغییرفازدهنده

۱. مقدمه

یکی از بخش‌هایی که همواره مصرف انرژی زیادی دارد، ساختمان‌ها هستند و انرژی مصرفی بیشتر ساختمان‌ها از دو حامل انرژی برق و گاز طبیعی است. برق یکی از حامل‌های مهم انرژی‌های در جهان است و بشر همواره در پی تولید و بهره‌برداری این حامل انرژی بوده است. افزایش مصرف برق در قرن بیستم دولت‌ها را بر آن داشته تا با ساخت نیروگاه‌های مختلف به تقاضای کشور خود برای این نوع انرژی ثانویه پاسخ دهند [۱]. اما ساخت این نیروگاه‌ها اغلب بدون برنامه‌ریزی و مطالعات مکان‌یابی، جوامع

انسانی این کشورها را با مشکلات جدی مواجه کرده است. امروزه، به دلیل محدودیت منابع فسیلی و افزایش تقاضای انرژی و در نهایت، ملاحظات زیست‌محیطی، بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر اجتناب‌ناپذیر شده است [۲]. انرژی خورشیدی شکلی از انرژی تجدیدپذیر است که می‌تواند برای مبارزه با تغییرات آب‌وهوایی، با حمایت مصرف‌کنندگان خصوصی و دولتی مورد استفاده قرار گیرد. عوامل متعددی بر عملکرد اقتصادی و سرمایه‌گذاری در انرژی خورشیدی مؤثر هستند؛ از جمله متوسط تابش سالانه، میزان مصرف کاربران، سیاست‌های تشویقی و تعرفه‌ها، در دسترس بودن فضا برای نصب فتوولتاییک، میزان تولید پل‌ها و ... [۳ و ۴].

* نویسنده مسئول

Email: a.h.heydari.uok@gmail.com

نظارت میدانی نشان داد ارزش خالص کنونی، دوره بازپرداخت تنزیل شده، نرخ بازده داخلی و هزینه تراشده سیستم انرژی به ترتیب ۴۷۸۹۳۴ کرون نروژ، ۲۲ سال، ۶ درصد و ۱/۲۸ کرون در هر کیلووات ساعت است.

دوسونچت^۸ و تلارتنی^۹ [۱۰] در تحقیقی به مطالعه مواضع برخی از کشورهای اتحادیه اروپا در مورد توسعه سیستم‌های فتوولتاییک پرداختند. پنج کشور اروپایی فرانسه، آلمان، یونان، ایتالیا و انگلستان که در سال‌های اخیر بهترین عملکرد در ارتقای بخش فتوولتاییک را داشتند، مورد بررسی قرار گرفتند. مقایسه‌های مبتنی بر شاخص‌های اقتصادی مانند ارزش خالص کنونی و نرخ بازده داخلی برای سیستم‌های PV با اندازه‌های مختلف انجام شد، که نشان داد در برخی شرایط، سیاست‌های پشتیبانی می‌تواند برای مالک سیستم PV ناخوشایند باشد. این مقاله همچنین نشان می‌دهد بهترین سود برای صاحب سیستم PV در کشورهایی به دست می‌آید که در آن‌ها یک طرح جبران برق فعال وجود دارد. تجزیه و تحلیل‌های خروجی این تحقیق می‌تواند برای موارد زیر کمک کننده باشد:

- ارزیابی تأثیر سیاست‌های این حوزه در کشورهای عضو اتحادیه اروپا
 - پیش‌بینی چگونگی تحول بازار فتوولتاییک در کشورهای منتخب اتحادیه اروپا
 - آگاهی از آینده سیاست‌های احتمالی انرژی
- حیدری و خوشخو [۱۱] در مقاله‌ای به بررسی وضعیت میزان تولید پنجره‌های فتوولتاییک در چهار اقلیم و چهار جهت جغرافیایی در کشور ایران پرداختند. دوره بازگشت سرمایه استفاده از پنجره فتوولتاییک به عنوان پوخته دوم ساختمان در جهت‌های جنوبی، غربی و شرقی حدود ۱۰-۱۱ سال در بندرعباس، حدود ۱۳-۱۵ سال در یزد و ۱۸/۵ سال در جهت جنوبی رشت بود.
- ساکسنا^{۱۰} و همکاران [۱۲] در پژوهشی روی مواد تغییر فاز دهنده ترکیب با آجر، به عنوان راهکار غیرفعال برای کاهش بار سرمایش تحقیق کردند. در این پژوهش آجرهای از جنس مواد تغییر فاز دهنده در شرایط واقعی و پیکربندی‌های متفاوت تغییر فاز دهنده‌ها در آجر را مورد

تودیسکا^۱ و همکاران [۵] به منظور درک بهتر رشد صنعت فتوولتاییک در کشور ایتالیا به ارزیابی اقتصادی سیستم‌های فتوولتاییک در چهار مزرعه مختلف این کشور پرداختند، چرا که با توجه به مشوق‌های قابل توجهی که توسط سیاست‌های انرژی این کشور تصویب شده بود، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و مزایای مالیاتی بسیاری حاصل می‌شد. نتایج نشان داد تحقق سرمایه‌گذاری موفق در این حوزه در کشور ایتالیا هم با شرایط فعلی و هم با تغییر تعرفه‌ها و سرمایه‌گذاری به راحتی تضمین می‌شود.

اکینسپیه^۲ و همکاران [۶] در مقاله‌ای به بررسی امکان استقرار یک سیستم فتوولتاییک خارج از شبکه برای هدایت به ساختمان مسکونی در جوس نیجریه پرداختند. پس از شبیه‌سازی نیروگاه مورد نظر، دست یافتند که با ۱۰ ماژول ۲۷۵ وات و ۵ باتری ۱۰۰ اهم می‌توان تولید برق سالانه ۳۱۳۲ کیلووات ساعت را برآورده کرد.

شوکلای^۳ و همکاران [۷] در پژوهشی به طراحی یک سیستم فتوولتاییک پشت‌بام برای یک خوابگاه پرداخته‌اند. مجموع خروجی سالانه انرژی داده شده به شبکه ۱۹۲۷/۷ کیلووات ساعت و متوسط انرژی خروجی ۱۶۰/۶۴ کیلووات ساعت در ماه بود. از لحاظ اقتصادی دوره بازگشت سرمایه این پروژه با توجه به شرایط اقتصادی منطقه مورد مطالعه ۸/۲ سال حاصل شد.

مندیتا^۴ و هرناندز^۵ [۸] در پژوهشی به نظارت بر یک سال بهره‌برداری از سیستم‌های فتوولتاییک برای مصرف خود ساختمان در کشور اسپانیا پرداختند. در پژوهش یادشده مقررات جدید مصرف برق در کشور اسپانیا مورد ارزیابی قرار گرفت و زمان بازگشت سرمایه این طرح ۸ تا ۹ سال به دست آمد.

غلامی^۶ و همکاران [۹] در مقاله‌ای هزینه چرخه عمر نمای BIPV ساختمان سولسماراگدن^۷ را طی یک دوره ۴ ساله (۲۰۱۶-۲۰۱۹) بررسی کردند. این ساختمان یک ساختمان تجاری در نروژ است که حداکثر توان PV این ساختمان ۱۲۷/۵ کیلووات است. نتایج عملکرد تحت

1. Tudisca
2. Akinsipe
3. Shukla
4. Mendieta
5. Hernández
6. Gholami
7. Solsmaragden

8. Dusonchet

9. Telaretti

10. Saxena

وضعیت اقتصادی کنونی ایران و نرخ‌های جدید وزارت نیرو مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و هم از لحاظ میزان بازدهی و تولید و هم از لحاظ اقتصادی بررسی شده‌اند. در ادامه به انتخاب روش تحقیق و مطالعه موردی یک ساختمان نمونه برای یافتن تکنولوژی مؤثر و اقتصادی به منظور کاهش مصرف انرژی ساختمان در ایران پرداخته شده است.

۲. مواد و روش

انتخاب روش صحیح و متناسب با پژوهش از مهم‌ترین ارکان یک تحقیق است. هدف اصلی این پژوهش، مقایسه فنی و اقتصادی استفاده از مواد تغییرفازدهنده، فتوولتاییک پشت‌بام و پنجره‌های فتوولتاییک است. برای این منظور، ابتدا به یافتن یک ساختمان برای مطالعه موردی و بررسی این موارد پرداخته شد تا با استفاده از نقشه‌ها و اطلاعات موجود ساختمان، از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز دیزاین‌بیلدر و PVsyst برای ارزیابی این تکنولوژی‌ها استفاده شود.

برای مطالعه موردی ساختمان نظام مهندسی استان ایلام، به عنوان کیس پروژه انتخاب شد. نمای بیرونی ساختمان در شکل ۱ نشان داده شده است. ساختمان در شهر ایلام با عرض جغرافیایی $38^{\circ}30'33''$ و طول جغرافیایی $41^{\circ}15'46''$ است. ساختمان ۵ طبقه است، سالن آمفی‌تئاتر در طبقه همکف، واحد مسکونی سرایداری و سالن غذاخوری در طبقه اول و سایر قسمت‌های ساختمان کاربرد اداری دارد. متراژ هر بخش در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۲ نقشه دوبعدی یکی از پلان‌های ساختمان که مربوط به طبقه همکف است، نشان می‌دهد.

بررسی قرار دادند. این آزمایش‌ها برای شرایط اوج تابستان، با دمای محیط بیشتر از 40°C و طی روز انجام شد. آجرهای دارای تک‌لایه و دولایه مواد تغییرفازدهنده، کاهش دمای 40°C تا $9/5^{\circ}\text{C}$ در مقایسه با نمونه معمولی داشتند. کاهش انتقال حرارت بین 40 تا 60 درصد طی روز مشاهده کردند و کاهش کلی گرما بین 16 تا 20 درصد طی 24 ساعت از جمله نتایج این آزمایش‌ها بود.

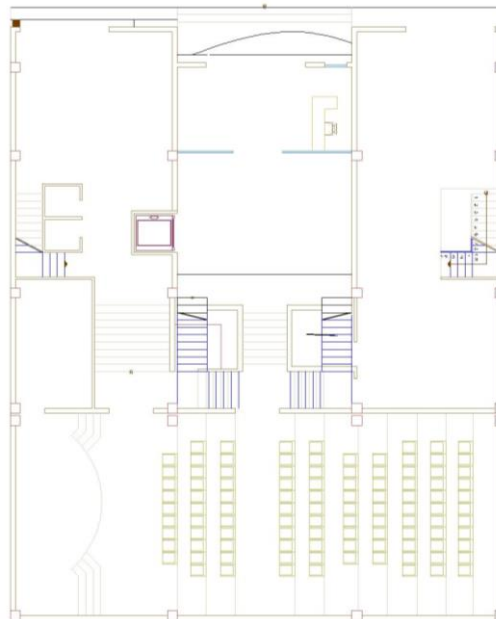
وزارت نیرو همواره به استفاده و احداث نیروگاه فتوولتاییک در ساختمان‌ها توصیه دارد و در این راستا نرخ‌هایی را برای خرید تضمینی برق ارائه می‌دهد. در جدیدترین ابلاغیه خود که در اردیبهشت ۱۴۰۰ اعلام شد، نرخ‌های جدید را $1/4$ معادل نرخ‌های قبلی که در سال ۱۳۹۸ اعلام شده بود، اعلام کرد [۱۳]. در زمینه نیروگاه‌های فتوولتاییک ساختمان در ایران و جهان پژوهش‌های بسیاری انجام شده است. در این مقاله هدف بررسی احداث یک نیروگاه فتوولتاییک با توجه به میزان فضای در دسترس و مقایسه با پنجره‌های فتوولتاییک و مواد تغییرفازدهنده در ساختمان است. به این منظور، بررسی می‌شود که کدام یک می‌تواند انرژی بیشتری را تولید یا کاهش دهد و از لحاظ اقتصادی با شرایط اقتصادی کنونی ایران و نرخ جدید تعرفه‌های خرید تضمینی برق تجدیدپذیر توسط وزارت نیرو، در صورت فروش برق در مقایسه با استفاده از برق در محل تولید در ساختمان چه تفاوتی دارد. مطالعات بسیاری در زمینه شیشه‌ها و پنل‌های فتوولتاییک و مواد تغییرفازدهنده انجام شده است، ولی تفاوت اساسی این تحقیق با سایر مطالعات این است که سه تکنولوژی یادشده به صورت هم‌زمان با توجه به



شکل ۱. نمای بیرونی ساختمان

جدول ۱. متراژ بخش‌های مختلف ساختمان

ردیف	نوع استفاده	متراژ (m ²)
۱	اداری	۱۰۳۱
۲	مسکونی	۸۸
۳	سالن غذاخوری	۶۲
۴	آمفی تئاتر	۱۲۲
۵	پارکینگ و موتورخانه	۸۴



شکل ۲. پلان طبقه همکف ساختمان

پنجره‌های ساختمان مورد بررسی از جنس آلومینیوم و UPVC است. میزان بازشوندگی پنجره‌ها خارجی نمای جلویی ساختمان به طور میانگین ۵ درصد است. همچنین، همگی پنجره‌ها دوجداره با مقدار فاصله ۱۳ میلی‌متر بین دو شیشه است. درب‌های خارجی ساختمان فلزی و داخلی چوبی از جنس چوب بلوط است و اطلاعات مربوط به هر لایه درها و پنجره‌ها در جدول ۴ آمده است.

ابتدا به داده‌های میزان مصرف برق ساختمان در سال‌های گذشته رجوع کرده و میزان مصرف ۷ سال گذشته ساختمان استخراج شد (جدول ۲) [۱۴]. مصالح ساختمانی استفاده‌شده در این ساختمان به همراه لایه‌های به‌کاررفته در هر قسمت با بیان ویژگی هر ماده و همچنین، میزان عبور گرما از هر قسمت که به عنوان U-Value شناخته می‌شود در جدول ۳ نشان داده شده است. چهارچوب

جدول ۲. مصرف برق سالانه ساختمان مورد مطالعه

سال	میزان مصرف (MWh)
۹۳	۲۶۰
۹۴	۲۴۵٫۵
۹۵	۲۱۴٫۰۵
۹۶	۲۵۸٫۳
۹۷	۲۳۹٫۶۵
۹۸	۳۴۰٫۲
۹۹	۲۸۳
میانگین مصرف ۷ ساله	۲۶۲٫۹۶

حیدری و حقیقی خوشخو: مطالعه فنی و اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتاییک پشت‌بام، پنجره فتوولتاییک و ...

جدول ۳. مصالح ساختمانی به‌کاررفته در ساختمان

U-Value (W/m ² -K)	چگالی (kg/m ³)	گرمای ویژه (J/kg-K)	انتقال حرارت رسانایی (W/m-K)	ضخامت (m)	لایه‌ها
۲,۱۱۲					دیوار خارجی
	۱۷۶۰	۸۴۰	۰,۷۲	۰,۰۲	پلاستر سیمانی
	۱۷۰۰	۸۰۰	۰,۸۴	۰,۲	آجر خارجی
	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۰,۴	۰,۰۱۵	پلاستر گچ
۲,۰۱۵					دیوار داخلی
	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۰,۴	۰,۰۱۵	پلاستر گچ
	۱۷۰۰	۸۰۰	۰,۶۲	۰,۱	آجر داخلی
	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۰,۴	۰,۰۱۵	پلاستر گچ
۲,۴۹۹					بام
	۲۱۰۰	۱۰۰۰	۰,۷	۰,۰۱	آسفالت
	۱۸۶۰	۸۴۰	۰,۷۲	۰,۱۵	بتن
	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۰,۴	۰,۰۱۵	پلاستر گچ
۱,۸۱۹					کف طبقات داخلی
	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۰,۴	۰,۰۱۵	پلاستر گچ
	۱۸۶۰	۸۴۰	۰,۷۲	۰,۱۵	بتن
	۱۷۶۰	۸۴۰	۰,۷۲	۰,۰۲	سیمان
	۱۷۰۰	۸۵۰	۰,۸	۰,۰۰۵	سرامیک
۲,۸۱۶					کف هم‌سطح زمین
	۱۷۶۰	۸۴۰	۰,۷۲	۰,۱	سیمان
	۱۷۰۰	۸۵۰	۰,۸	۰,۰۰۵	سرامیک

جدول ۴. مشخصات و اطلاعات پنجره و درب‌های به‌کاررفته در ساختمان

U-Value (W/m ² -K)	چگالی (kg/m ³)	گرمای ویژه (J/kg-K)	انتقال حرارت رسانایی (W/m-K)	ضخامت (m)	لایه‌ها
۱,۹۶					پنجره
	-	-	۰,۹	۰,۰۰۳	شیشه از نوع Generic PYR B CLEAR
	-	-	-	۰,۰۱۳	هوا
	-	-	۰,۹	۰,۰۰۳	شیشه از نوع Generic CLEAR
۵,۸۸۱					درب خارجی
	۷۹۰۰	۵۳۰	۷۲	۰,۰۰۲	آهن
۲,۸۲۳					درب داخلی
	۷۰۰	۲۳۹۰	۰,۱۹	۰,۰۳۵	بلوط نقاشی‌شده

۳. شبیه‌سازی سیستم فتوولتاییک پشت‌بام

برای طراحی و مدل‌سازی سیستم فتوولتاییک پشت‌بام در این ساختمان از نرم‌افزار PVsyst استفاده شده است [۱۵]. با توجه به فضای تقریباً ۳۰۰ مترمربعی در دسترس پشت‌بام، یک نیروگاه ۱۷ کیلووات متصل به

شبکه با استفاده از ۵۷ عدد پنل فتوولتاییک از نوع یینگلی‌سولار^۱ ۳۱۰ وات مطابق اطلاعات جدول ۵ در شرایط استاندارد مناسب موقعیت جغرافیایی شهر ایلام

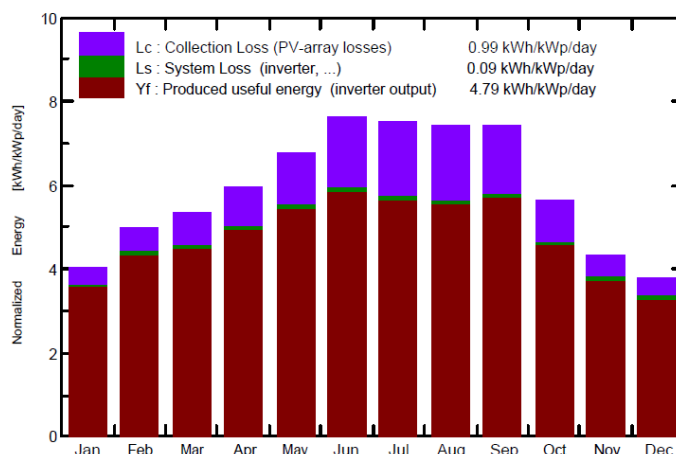
1. Yingli Solar

می‌دهد و در شکل ۴، E-Grid انرژی الکتریکی تزریق شده به شبکه از طرف این نیروگاه است که مقدار آن ۳۰/۹۲ مگاوات ساعت در یک سال است.

شبیه‌سازی شد. شکل‌های ۳ و ۴ نتایج خروجی شبیه‌سازی نرم‌افزار هستند که شکل ۳ تولید نرمالیزه‌شده به ازای هر کیلووات پنل نصب‌شده را نشان

جدول ۵. داده‌های سیستم فتوولتاییک پشت‌بام

نوع پنل	Si-poly Model YL310P-35b
برند	Yingli Solar
توان هر پنل	۳۱۰ Wp
تعداد	۵۷ (۱۹ سری و ۳ موازی)
سطح کل پنل‌ها	۱۱۱ مترمربع
سطح سلول‌ها	۹۹,۹ مترمربع
U mpp	۶۲۴ ولت
I mpp	۲۵ آمپر
شیب صفحه	۳۰ درجه



شکل ۳. تولید نرمالیزه‌شده به ازای هر کیلووات پنل نصب‌شده

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	84.7	36.05	4.64	124.3	121.4	2.013	1.970	0.897
February	104.9	44.02	6.78	139.1	135.4	2.207	2.162	0.880
March	139.9	62.35	10.80	164.6	159.5	2.539	2.487	0.855
April	169.5	74.44	14.90	178.1	172.5	2.678	2.626	0.834
May	216.8	79.06	20.07	209.1	202.6	3.050	2.992	0.810
June	244.4	74.56	26.74	227.4	220.5	3.180	3.122	0.777
July	245.0	73.71	29.65	232.5	225.7	3.176	3.119	0.759
August	223.4	68.77	29.53	229.5	223.4	3.113	3.058	0.754
September	190.9	54.53	24.70	221.9	216.5	3.101	3.045	0.777
October	136.5	49.47	18.32	174.7	170.5	2.568	2.520	0.816
November	91.3	39.42	10.38	130.2	126.8	2.040	1.999	0.869
December	76.9	33.45	6.47	115.8	112.8	1.863	1.823	0.891
Year	1924.2	689.82	16.97	2147.2	2087.6	31.528	30.923	0.815

شکل ۴. خروجی شبیه‌سازی شده نیروگاه پشت‌بام در نرم‌افزار PVsyat

شیشه فتوولتاییک با مشخصات جدول ۶ استفاده شد. با وجود تقریباً ۱۲۰ مترمربع مساحت خارجی پنجره‌های ساختمان، شیشه‌های فتوولتاییک تولید ۳/۶۷ مگاوات ساعت در سال را داشتند که چیزی حدود ۱/۴ مصرف کل ساختمان است.

۴. شبیه‌سازی پنجره‌های فتوولتاییک

همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، نمای بیرونی ساختمان به صورت شیشه‌ای یکپارچه است، شکل ۵ ساختمان شبیه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر را نشان می‌دهد و لایه خارجی پنجره‌های دوجداره از یک نوع



شکل ۵. شبیه‌سازی ساختمان در دیزاین بیلدر برای بررسی عملکرد پنجره فتوولتائیک

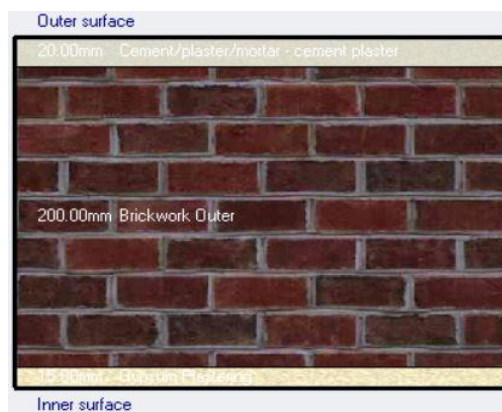
جدول ۶. مشخصات شیشه فتوولتائیک

سیلیکون آمورف	نوع سلول خورشیدی
0.87 m^2	سطح PV
38 W	توان خروجی
58.6 V	حداکثر ولتاژ
0.684 A	حداکثر جریان
91.8 V	ولتاژ مدار باز
0.972 A	جریان اتصال کوتاه

شده است. با فرض به‌کارگیری روکشی از مواد تغییرفازدهنده در بخش داخلی دیوار که برای جلوگیری از اتلاف انرژی و ذخیره مقداری از انرژی پیشنهاد شده است، از یک نوع تغییر فازدهنده با مشخصات جدول ۷ جهت شبیه‌سازی جدید استفاده شد. شماتیک سطح مقطع و لایه‌بندی مصالح دیوار با وجود لایه مواد تغییرفازدهنده در شکل ۷ نشان داده شده است.

۵. شبیه‌سازی مواد تغییرفازدهنده

در ساختمان شبیه‌سازی‌شده در دیزاین‌بیلدر به بررسی و مقایسه استفاده از مواد تغییرفازدهنده پرداخته شد. به این صورت که میزان مصرف ساختمان در حالت اولیه با زمانی که به دیوار خارجی ساختمان مواد تغییرفازدهنده اضافه شود، مصرف چه تغییری خواهد کرد. شماتیک سطح مقطع و لایه‌بندی مصالح دیوار خارجی در شکل ۶ آورده



شکل ۶. سطح مقطع و لایه‌بندی مصالح دیوار خارجی

جدول ۷. مشخصات ماده تغییرفازدهنده مورد استفاده

۰٫۲	ضریب انتقال حرارت (W/m-K)
۱۹۷۰	گرمای ویژه (J/kg-K)
۲۳۵	چگالی (kg/m^3)
۰٫۰۷۴۲	ضخامت (m)



شکل ۷. سطح مقطع و لایه‌بندی مصالح دیوار خارجی با وجود تغییرفازدهنده

لایه ماده تغییرفازدهنده در جدول ۸ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماده تغییرفازدهنده در ساختمان مورد مطالعه کاهش مصرف انرژی چشمگیری نداشته و این کاهش مصرف برای برق و گاز ساختمان به ترتیب چیزی حدود ۱/۸ و ۱/۸ درصد است.

جدول ۸. مصرف با وجود لایه ماده تغییرفازدهنده

گاز طبیعی	برق	حالت
۹۷۷٫۵۵	۲۴۳٫۲۸	مصرف در حالت اولیه (MWh)
۹۵۹٫۴۳	۲۳۸٫۱۳	مصرف با وجود PCM (MWh)
۱٫۸	۲٫۱	کاهش مصرف (%)

برق را برای نیروگاه‌های خورشیدی با ظرفیت کمتر از ۲۰ کیلووات، ۱۴۵۶۰ ریال به ازای هر کیلووات‌ساعت اعلام کرد و قرارداد ۲۰ ساله بوده و نرخ خرید در ۱۰ سال دوم در عدد ۰/۷ ضرب می‌شود. هدف این بخش، بررسی اقتصادی فروش برق نیروگاه بر اساس تعرفه‌های جدید به وزارت نیرو و مقایسه اقتصادی آن با زمانی که برق به شبکه فروخته نشود و برای مصرف خود ساختمان استفاده شود، است.

با بررسی و تحقیق در نمایندگی‌های فروش تجهیزات و تکنسین‌های نصب و راه‌اندازی نیروگاه خورشیدی، پی برده شد که قیمت هر کیلووات احداث نیروگاه خورشیدی ابعاد کوچک چیزی حدود ۱۵ میلیون هزینه دارد. یعنی در واقع

پس از اطمینان از صحت شبیه‌سازی، با تغییر پارامترهای دیوار شبیه‌سازی شده و افزودن لایه ماده تغییرفازدهنده در بخش داخلی دیوارهای خارجی ساختمان، مدل‌سازی را دوباره انجام داده و به بررسی خروجی‌های مدل پرداخته شده است. نتایج میزان مصرف برق و گاز ساختمان با وجود اضافه شدن

۶. تحلیل نتایج

با مقایسه سه راهکار مدل‌سازی شده، نشان داده شد استفاده از ماده تغییرفازدهنده ۲/۱ درصد کاهش مصرف برق و پنجره‌های فتوولتاییک ۱/۴ درصد کاهش مصرف برق به همراه دارند، در حالی که نیروگاه فتوولتاییک پشت‌بام با تولید ۳۰/۹۲ مگاوات ساعت در سال تقریباً ۱۱/۵ درصد برق مصرفی ساختمان را جبران می‌کند. بنابراین، با توجه به شرایط بهتر نیروگاه فتوولتاییک نسبت به دو روش دیگر، در ادامه به تحلیل اقتصادی سیستم فتوولتاییک پشت‌بام پرداخته شده است. در اردیبهشت ۱۴۰۰ وزارت نیرو نرخ خرید تضمینی

نیروگاه دوره بازگشت سرمایه سالانه ۶/۳ سال حاصل شد. در تحلیل اقتصادی نیروگاه خورشیدی بدون احتساب فروش برق و فقط استفاده از انرژی در محل و با فرض بدون باتری (در زمان غیر استفاده به شبکه داده شود و در زمان نیاز از شبکه گرفته شود) دوباره دوره بازگشت سرمایه سالانه حساب شد و همان‌گونه که در جدول ۱۱ و شکل ۹ نشان داده شده است، در دوره ۲۰ ساله عمر پروژه این امر محقق نمی‌شود. در این بخش از تحلیل، سود پروژه را عدم پرداخت بخشی از قبض برق به دلیل مصرف کمتر در نظر گرفته شده است.

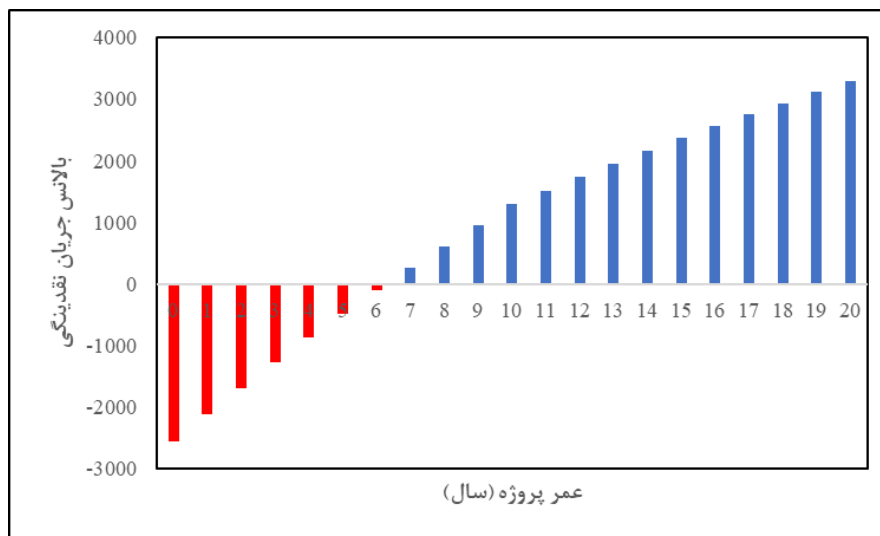
هزینه اولیه احداث این نیروگاه ۱۷ کیلووات، ۲۵۵ میلیون تومان است. البته هزینه نیروگاه به تفکیک تجهیزات در جدول ۹ آورده شده است که تقریباً با عددی که برای احداث هر کیلووات احداث نیروگاه پیش‌بینی شد، همخوانی دارد. نرخ بهره ۱۸ درصد و نرخ تعدیل ۱۵ درصد در نظر گرفته شد. در جدول ۱۰ و شکل ۸ جریان نقدینگی این نیروگاه برای ۲۰ سال عمر پروژه را مشاهده می‌فرمایید. با توجه به اینکه نیروگاه خورشیدی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و استهلاکی خاصی ندارد، فقط در مناطق آلوده با توجه به شرایط به صورت دوهفته‌ای یا ماهانه پنل‌ها باید شست‌وشو شوند. برای این

جدول ۹. هزینه بخش‌های مختلف احداث نیروگاه ۱۷ کیلووات

ردیف	عنوان هزینه	واحد	تعداد	قیمت واحد (میلیون ریال)	قیمت کل (میلیون ریال)
۱	پنل ۳۱۰ وات	عدد	۵۷	۳۵	۱۹۹۵
۲	اینورتر	عدد	۱	۳۵۰	۳۵۰
۳	سازه و فونداسیون	مجموعه	۱	۱۰۰	۱۰۰
۴	کابل AC و DC و تجهیزات جانبی	مجموعه	۱	۴۰	۴۰
۵	تابلو AC و DC	مجموعه	۱	۵۰	۵۰
۶	نصب و راه‌اندازی	مجموعه	۱	۴۰	۴۰
۷	اجرای سیستم ارتینگ	مجموعه	۱	۳۰	۳۰
۸	امکان‌سنجی، طراحی و نظارت	مجموعه	۱	۱۵۰	۱۵۰

جدول ۱۰. تحلیل اقتصادی نیروگاه خورشیدی با احتساب فروش برق

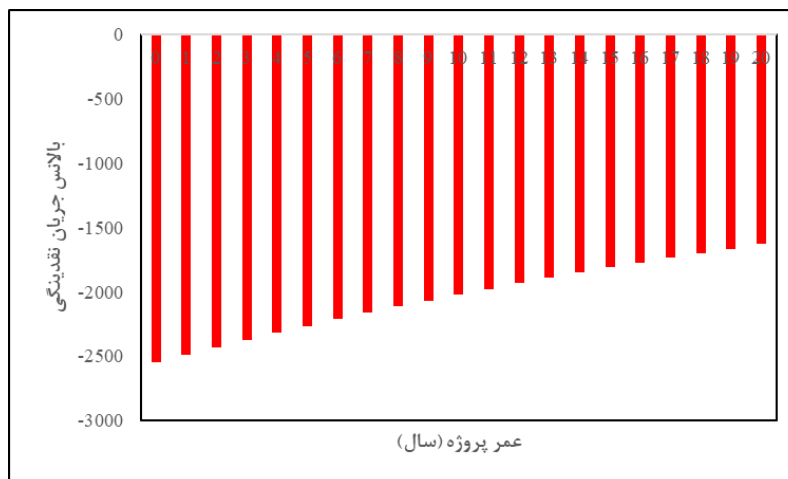
سال	جریان نقدینگی (میلیون ریال)	ارزش فعلی (میلیون ریال)	بالانس (میلیون ریال)
۰	-۲۵۵۰	-۲۵۵۰	-۲۵۵۰
۱	۴۵۰	۴۳۷	-۲۱۱۲
۲	۴۵۰	۴۲۴	-۱۶۸۸
۳	۴۵۰	۴۱۲	-۱۲۷۶
۴	۴۵۰	۴۰۰	-۸۷۶
۵	۴۵۰	۳۸۸	-۴۸۸
۶	۴۵۰	۳۷۷	-۱۱۰
۷	۴۵۰	۳۶۶	۲۵۵
۸	۴۵۰	۳۵۵	۶۱۰
۹	۴۵۰	۳۴۵	۹۵۵
۱۰	۴۵۰	۳۳۵	۱۲۹۰
۱۱	۳۱۵	۲۲۷	۱۵۱۸
۱۲	۳۱۵	۲۲۱	۱۷۳۹
۱۳	۳۱۵	۲۱۴	۱۹۵۳
۱۴	۳۱۵	۲۰۸	۲۱۶۲
۱۵	۳۱۵	۲۰۲	۲۳۶۴
۱۶	۳۱۵	۱۹۶	۲۵۶۱
۱۷	۳۱۵	۱۹۰	۲۷۵۱
۱۸	۳۱۵	۱۸۵	۲۹۳۶
۱۹	۳۱۵	۱۷۹	۳۱۱۶
۲۰	۳۱۵	۱۷۴	۳۲۹۱



شکل ۸. جریان نقدینگی نیروگاه خورشیدی با احتساب فروش برق

جدول ۱۱. تحلیل اقتصادی نیروگاه خورشیدی در صورت استفاده در محل

سال	جریان نقدینگی (میلیون ریال)	ارزش فعلی (میلیون ریال)	بالانس (میلیون ریال)
۰	-۲۵۵۰	-۲۵۵۰	-۲۵۵۰
۱	۶۱	۶۰	-۲۴۸۹
۲	۶۱	۵۸	-۲۴۳۱
۳	۶۱	۵۶	-۲۳۷۵
۴	۶۱	۵۴	-۲۳۲۰
۵	۶۱	۵۳	-۲۲۶۶
۶	۶۱	۵۱	-۲۲۱۴
۷	۶۱	۵۰	-۲۱۶۴
۸	۶۱	۴۸	-۲۱۱۵
۹	۶۱	۴۷	-۲۰۶۸
۱۰	۶۱	۴۶	-۲۰۲۲
۱۱	۶۱	۴۴	-۱۹۷۷
۱۲	۶۱	۴۳	-۱۹۳۴
۱۳	۶۱	۴۲	-۱۸۹۲
۱۴	۶۱	۴۰	-۱۸۵۱
۱۵	۶۱	۳۹	-۱۸۱۱
۱۶	۶۱	۳۸	-۱۷۷۳
۱۷	۶۱	۳۷	-۱۷۳۵
۱۸	۶۱	۳۶	-۱۶۹۹
۱۹	۶۱	۳۵	-۱۶۶۴
۲۰	۶۱	۳۴	-۱۶۲۹



شکل ۹. جریان نقدینگی نیروگاه خورشیدی در صورت استفاده در محل

۷. نتیجه‌گیری

هدف این مقاله، مقایسه کاهش مصرف و تولید برق از سه راهکار سیستم فتوولتاییک پشت‌بام، پنجره‌های فتوولتاییک و مواد تغییرفازدهنده در بخش داخلی دیوارهای خارجی ساختمان مورد مطالعه بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد استفاده از سیستم فتوولتاییک پشت‌بام با تولید ۳۰/۹۲ مگاوات ساعت در سال بیشترین کاهش مصرف انرژی یعنی ۱۱/۵ درصد مصرف برق سالانه را در پی داشت و پنجره‌های فتوولتاییک با تولید ۳/۶۷ مگاوات ساعت در سال چیزی حدود ۱/۴ مصرف کل ساختمان کاهش دادند و همچنین، مواد تغییرفازدهنده، مصرف برق و گاز ساختمان را به‌ترتیب حدود ۲/۱ و ۱/۸ درصد کاهش داد. در ادامه بررسی احداث یک نیروگاه بر اساس تعرفه‌های سال ۱۴۰۰ وزارت نیرو و شرایط کنونی اقتصاد ایران انجام شد و نشان داده شد در صورت احداث یک نیروگاه متناسب با فضای در دسترس، فروش برق خروجی نیروگاه به وزارت نیرو و یا استفاده برای خود ساختمان به منظور کاهش مصرف برق از لحاظ اقتصادی چگونه است. مشاهده شد بر اساس تعرفه‌های جدید، احداث یک نیروگاه ۱۷ کیلووات دوره بازگشت سرمایه تقریباً ۶/۳ سال دارد، ولی در صورت استفاده از برق تولیدی نیروگاه برای خود ساختمان، دوره بازگشت سرمایه نیروگاه در مدت عمر ۲۰ ساله پروژه حاصل نمی‌شود و با توجه به اینکه قیمت خرید وزارت نیرو به قیمت واقعی برق نزدیک‌تر است، بازگشت سرمایه معقول دارد و به‌صرفه نبودن احداث نیروگاه برای مصرف در ساختمان می‌تواند

هشدار بر ارزان بودن حامل‌های انرژی همچون برق باشد که توجه اقتصادی ندارد و شاید واقعی‌سازی قیمت برق بتواند راهکاری برای ترغیب شدن ساختمان‌ها به کاهش مصرف برق و حتی استفاده از نیروگاه‌های فتوولتاییک برای استفاده در محل باشد.

منابع

- [1].Khazaei, M., et al., Assessment of renewable energy production capacity of Asian countries: a review. *New Energy Exploitation and Application*, 2022. 1(2): p. 25-41.
- [2].Kannan, D., et al., A hybrid approach based on MCDM methods and Monte Carlo simulation for sustainable evaluation of potential solar sites in east of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 2021. 279: p. 122368.
- [3].Cucchiella, F., I. D'Adamo, and S.L. Koh, Environmental and economic analysis of building integrated photovoltaic systems in Italian regions. *Journal of Cleaner Production*, 2015. 98: p. 241-252.
- [4].Heydari AH. SWOT Analysis of Solar Energy Use in Desert Areas of Iran. *Journal of Sustainable Energy Systems* 2021;(2):161-73. [Persian]
- [5].Tudisca, S., et al., Economic analysis of PV systems on buildings in Sicilian farms. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2013. 28: p. 691-701.
- [6].Akinsipe, O.C., D. Moya, and P. Kaparaju, Design and economic analysis of off-grid solar PV system in Jos-Nigeria. *Journal of Cleaner Production*, 2021. 287: p. 1. 125055.

- [7]. Shukla, A.K., K. Sudhakar, and P. Baredar, Design, simulation and economic analysis of standalone roof top solar PV system in India. *Solar Energy*, 2016. **136**: p. 437-449.
- [8]. Ordóñez Mendieta, Á.J. and E.S. Hernández, Analysis of PV Self-Consumption in Educational and Office Buildings in Spain. *Sustainability*, 2021. **13**(4): p. 1662.
- [9]. Gholami, H., et al., Lifecycle cost analysis (LCCA) of tailor-made building integrated photovoltaics (BIPV) façade: Solsmaragden case study in Norway. *Solar Energy*, 2020. **211**: p. 488-502.
- [10]. Dusonchet, L. and E. Telaretti, Comparative economic analysis of support policies for solar PV in the most representative EU countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. **42**: p. 986-998.
- [11]. Heydari, A.H. and R. Haghighi Khoshkhoo, Techno-economical analysis of DSF, BIPV and PCM in administrative buildings in four climates of Iran. *International Journal of Ambient Energy*, 2022. **43**(1): p. 8474-8485.
- [12]. Saxena, R., D. Rakshit, and S. Kaushik, Experimental assessment of Phase Change Material (PCM) embedded bricks for passive conditioning in buildings. *Renewable Energy*, 2020. **149**: p. 587-599.
- [13]. Satba.2021; Available from: <http://www.satba.gov.ir/fa/guidance/guidance/guidance1>.
- [14]. The Ilam Power Distribution Company. 2021; Available from: <https://eserv.bargh-ilam.ir/Home/login>.
- [15]. Pvsyst. 2021; Available from: <https://www.pvsyst.com/>.