



Analysis and Evaluation of the Performance of Horizontal and Sloped Roofs in BAPV and BIPV Solar Systems (Case Study: Urmia City)

Parya Shafi Pouryourdshahi^{1*}, Hossein Soleimani²

¹Department of Architecture and Urban Planning, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²Assistant Professor with the Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article type:
Original Research

Received: 01.21.2023
Revised: 05.21.2023
Accepted: 06.17.2023

Keyword:
Architecture
Solar Energy
Horizontal Roof
Sloped Roof
BAPV
BIPV

***Corresponding Author:**
Parya Shafi Pouryourdshahi
Email: pshafipour@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Today, due to the increase in greenhouse gas concentrations and environmental pollution caused by fossil fuels, there is a great emphasis on using solar energy as a clean source of electricity generation. Most solar systems used in the world are of two types: BAPV (Building Applied Photovoltaic) and BIPV (Building Integrated Photovoltaic). In this study, the BAPV and BIPV solar systems and their performance on horizontal and sloping roofs in Urmia city were investigated. For this purpose, the effect of the slope angle on the panel efficiency and annual energy production was examined at different angles using the PVSyst 7.2 simulation software. The simulation results showed that the proposed system for a sloping roof with a 35-degree angle had the highest solar energy absorption rate. Comparing the panel efficiency on a sloping roof with a 35-degree angle and a horizontal roof, it was found that with the same number of panels, the efficiency of panels on a sloping roof in the BAPV system was 16% higher and in the BIPV system was 14% higher than that of a horizontal roof. Moreover, the amount of unused solar energy on sloping roofs with a 35-degree angle is 3.5% lower than that of a horizontal roof, considering the consumption pattern in BAPV and BIPV systems. Additionally, by sloping the roof at a 35-degree angle, the accessible space in the examined sample increases by 20%, which can be used for installing more solar panels.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Solar technology is rapidly advancing, leading to a significant reduction in the cost of solar energy. However, this progress also brings many challenges, particularly in the production and use of solar panels. Solar panels can be installed as part of the building structure, including roofs, facades, walls, and canopies, or installed independently on the building. Based on the installation and usage methods, solar systems are classified into two categories: BAPV and BIPV.

In Iran, the use of solar energy technology is still uncommon due to the low cost of fossil energy. As most roofs in Iran are horizontal, solar panels are typically arranged in a heterogeneous manner. Therefore, building design challenges when implementing solar systems have been discussed, and a solution has been proposed to improve the efficiency and aesthetic appeal of buildings. This study examines the performance of BAPV and BIPV solar systems on horizontal and sloping roofs in Urmia city, where limited research has been conducted on solar energy technology.

Methodology

The present study was applied research with a quantitative approach. It employed library studies to examine challenges faced by buildings with solar systems. In addition, the study used PVsyst7.2 software to simulate a sample solar system using the REC390tp25M72 panel model manufactured by Rec company. The simulation is conducted for both BAPV and BIPV systems in Urmia city, with different installation angles, to determine the angle that results in the highest annual efficiency. Moreover, the study analyzes the performance of horizontal and sloping roofs with BAPV and BIPV solar systems by conducting separate simulations for each.

Results and discussion

To investigate this issue, the researchers selected a villa building with a roof area of 150 square meters located in Urmia city for all months of the year. For the BAPV and BIPV systems, the researchers used the REC390tp25M72 model panel from Rec company, which has a production power of 390 watts, dimensions of 30 x 1001 x 2005 mm, and an average weight of 22 kg. By inputting information about the panel area and power into the PVsyst software, the researchers conducted a simulation to determine the number of panels needed to be placed in the given area and the amount of energy that the panel set will produce. According to the simulation results, 76 panels can be used, occupying an area of 153 square meters.

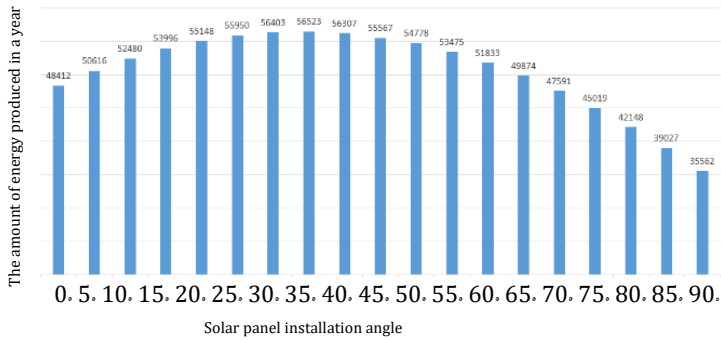


Figure 1. The amount of energy produced per year with different angles of the roof with solar panels

Figure 1 demonstrates a clear upward trend in electricity production as the angle of the solar panels increases from zero, with the maximum output occurring at an angle of 35 degrees. However, beyond this point, the electricity production begins to decrease. Thus, it can be concluded that the optimal angle for maximum energy production is 35 degrees.

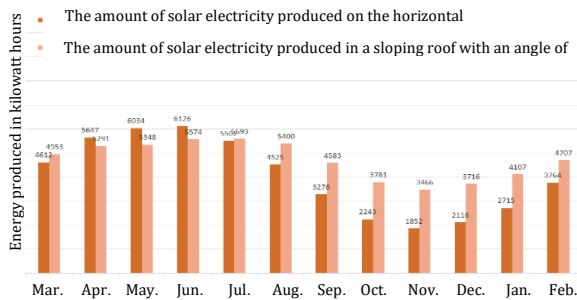


Figure 2. The solar electricity production was evaluated for both horizontal and sloping roofs with an angle of 35 degrees in the BAPV system.

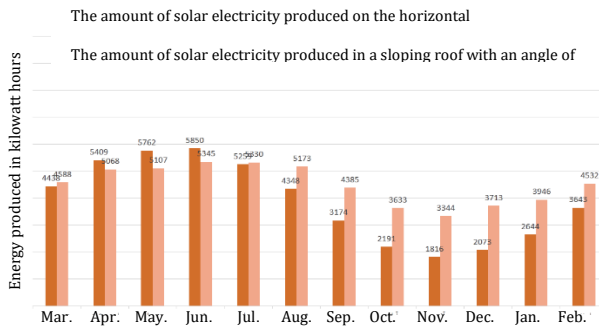


Figure 3. The amount of solar electricity produced in a horizontal roof and in a sloping roof with an angle of 35 degrees in the BIPV system

Although the panel production capacity is greater than the annual energy demand, the full utilization of solar energy is not achievable in a horizontal roof configuration. The simulation results indicated that 23.5% of the available energy remains unused on a horizontal roof. However, in the case of a sloping roof with an angle of 35 degrees, the amount of unused energy was reduced to 20% of the available energy.

In addition to increasing efficiency in the number of similar panels, sloping the roof also increased the required space. The following graphs show the comparison of efficiency and available area in the two buildings in question.

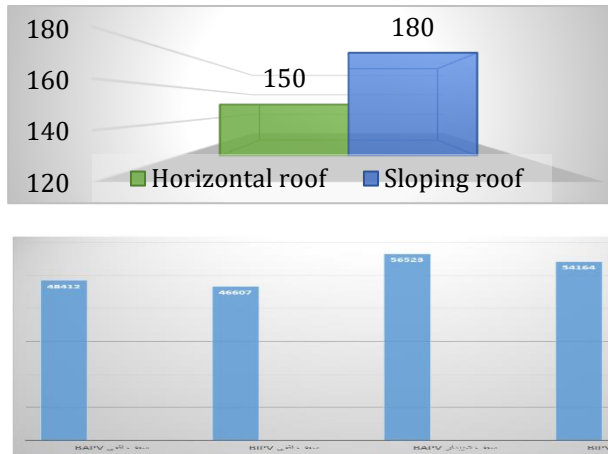


Figure 4. Right: The amount of electricity produced annually with the same number of panels (KW/h).
Left: Available area for installing panels (square meter).

Conclusion

The simulation results from PVsyst7.2 software indicated that the highest annual efficiency can be achieved with a sloping roof at an angle of 35 degrees in the solar system. When comparing the efficiency of panels between the sloping roof and horizontal roof, it was observed that for the same number of panels, the sloping roof in the BAPV system can achieve 16% more efficiency, and the BIPV system can achieve 14% more efficiency than the horizontal roof. Additionally, sloping roofs with an angle of 35 degrees exhibited 3.5% less unused solar energy, taking into account the consumption pattern in BAPV and BIPV systems, than horizontal roofs. Furthermore, by tilting the roof at an angle of 35 degrees, the available space in the sample increased by 20%. Therefore, implementing new design methods for buildings that incorporate sloping surfaces can lead to greater efficiency and less energy loss from solar systems, while also producing an aesthetically pleasing and optimal architectural design.



تحلیل و بررسی عملکرد سقف‌های افقی و شیبدار در سیستم‌های خورشیدی BAPV و BIPV (نمونه موردی: شهر ارومیه)

پریا شفیق پورپوردشاهی^{۱*}، حسین سلیمانی^۲

۱- گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱

پانزگی مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

کلید واژگان:

معماری

سقف افقی

سقف شیبدار

انرژی خورشیدی

BAPV

BIPV

*نویسنده مسئول: پریا شفیق پورپوردشاهی

پست الکترونیکی:

pshafipour@tvu.ac.ir

امروزه با توجه به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی، توجه زیادی به استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان انرژی پاک جهت تولید برق می‌شود. اکثر سیستم‌های خورشیدی استفاده شده در جهان به دو صورت فتوولتائیک اضافه شده در ساختمان^۱ BAPV و فتوولتائیک ادغام شده در ساختمان BIPV^۲ هستند. در پژوهش حاضر سیستم‌های خورشیدی BAPV و BIPV و عملکرد آنها در سقف‌های افقی و شیبدار در شهر ارومیه بررسی می‌شود. برای این منظور، تأثیر سقف شیبدار در بازدهی پنل‌ها و میزان انرژی تولیدی سالانه، با شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار PVsyst ۷.۲ در زوایای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از زوایای مختلف در شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی برای سقف شیبدار با زاویه ۳۵ درجه بیشترین جذب انرژی از خورشید را دارد. با مقایسه بازدهی پنل‌ها در سقف شیبدار با زاویه ۳۵ درجه و سقف افقی مشخص گردید که با تعداد پنل یکسان، بازدهی پنل‌ها در سقف شیبدار در سیستم BAPV، ۱۶ درصد و در سیستم BIPV، ۱۴ درصد نسبت به سقف افقی بیشتر است. همچنین میزان انرژی خورشیدی استفاده نشده در سقف‌های شیبدار با زاویه ۳۵ درجه با در نظر گرفتن الگوی مصرف در سیستم‌های BAPV و BIPV، ۳.۵ درصد کمتر از سقف‌های افقی می‌باشد. علاوه بر آن، با شیبدار کردن سقف با زاویه ۳۵ درجه، فضای قابل دسترس در نمونه بررسی شده، ۲۰ درصد افزایش می‌یابد که می‌توان از آن برای نصب پنل‌های بیشتر استفاده کرد.

¹ Building Applied Photovoltaic

² Building Integrated Photovoltaic



مقدمه

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های اقتصادی موجب افزایش تقاضای انرژی و متعاقب آن افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای در جهان شده است. نگرانی از افزایش این گازها باعث شده در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های پاک شود [۱-۳]. برای اجتناب از زیان گازهای گلخانه‌ای، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر یا انرژی‌های سازگار محیط‌زیست همچون انرژی خورشیدی پیشنهاد می‌شود. بعد از قرن ۱۹ میلادی، استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک انرژی پاک، افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است [۴-۷]. انرژی خورشیدی در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، یک انرژی پاک و امن است [۸]. نگرانی از آینده اقتصاد و کمبود انرژی محرک اصلی در استفاده از پنل‌های خورشیدی می‌باشد [۹]. در حال حاضر انرژی خورشیدی ۱/۵ برابر گران‌تر از سوخت‌های فسیلی است [۱۰]. برای رفع مشکل هزینه می‌توان با استفاده از پنل‌های خورشیدی، ساختمان را از یک مصرف‌کننده انرژی به تولیدکننده انرژی [۱۱] و انرژی خورشیدی دریافتی از پنل‌های خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل کرد [۱۲].

امروزه فناوری خورشیدی در حال پیشرفت و هزینه استفاده از انرژی خورشیدی به سرعت در حال کاهش است [۱۳]. این کار چالش‌های زیادی به همراه دارد که به عنوان نمونه نحوه تولید و استفاده از پنل‌های خورشیدی را می‌توان نام برد [۱۰]. انواع پنل‌های خورشیدی به طور کلی به دو دسته فناوری‌های فتوولتائیک و ترمیک تقسیم می‌شوند [۱۴]:

- ۱- **پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک:** این پنل‌ها از سلول‌های خورشیدی فتوولتائیک ساخته شده‌اند که توان الکتریکی را از نور خورشید به دست می‌آورند و معمولاً در سیستم‌های تولید برق خانگی و صنعتی استفاده می‌شوند.

- ۲- **پنل‌های خورشیدی ترمیک:** این پنل‌ها برای تولید گرما استفاده می‌شوند. در این نوع پنل، آب سرد از یک سمت پنل عبور می‌کند و در اثر تابش نور خورشید، گرم می‌شود و از سمت دیگر پنل به سیستم گرمایشی منتقل می‌شود. پنل‌های خورشیدی ترمیک در سیستم‌های گرمایش آب و هوا استفاده می‌شوند. علاوه بر این دسته‌بندی‌ها، پنل‌های خورشیدی بر اساس متریکال سلول‌های خورشیدی نیز می‌توانند تقسیم بندی شوند. برخی از انواع سلول‌های خورشیدی عبارتند از [۱۵؛ ۱۶]:

- ۱- **سلول‌های خورشیدی پلی کریستالی:** این نوع سلول‌ها از بلورهای خورشیدی پلی کریستالی ساخته شده‌اند و قیمت پایین‌تری نسبت به سایر نوع سلول‌ها دارند. با این حال، کارایی آنها کمتر است و برای کاربردهای بزرگتر نیاز به فضای بیشتری دارند.

- ۲- **سلول‌های خورشیدی تک بلوری:** این نوع سلول‌ها از بلورهای خورشیدی تک بلوری ساخته شده‌اند و کارایی بالاتری نسبت به سلول‌های خورشیدی پلی کریستالی دارند. با این حال، قیمت بالاتری نسبت به سلول‌های خورشیدی پلی کریستالی دارند.

- ۳- **سلول‌های خورشیدی فلزی:** این نوع سلول‌ها از موادی مانند کادمیوم تلورید و سلنیوم تشکیل شده‌اند و دارای کارایی بالایی برای جذب نور خورشید هستند. با این حال، قیمت بالای آنها باعث شده است که در سیستم‌های خورشیدی کوچکتر استفاده شوند.

- ۴- **سلول‌های خورشیدی آلی:** این سلول‌ها از موادی مانند پلیمرهای هدفمند ساخته شده‌اند و دارای وزن و حجم کمتری هستند. با این حال، کارایی آنها در حال حاضر پایین‌تر از سایر نوع سلول‌های خورشیدی است. همچنین، پنل‌های خورشیدی را می‌توان به عنوان بخشی از ساختمان در سقف‌ها، نماها، دیوارها، سایبان‌ها و غیره جاسازی نمود و یا به صورت جداگانه و مستقل بر روی ساختمان نصب کرد. بسته به روش نصب و استفاده پنل‌ها در ساختمان، سیستم‌های خورشیدی به دو دسته BAPV و BIPV تقسیم می‌شوند [۱۶].

بسته به نیاز و شرایط محیطی و تجهیزات و مواد اولیه موجود در هر منطقه، از هر یک از این نوع پنل‌ها می‌توان استفاده نمود. دوشاخص مهم برای انتخاب پنل، هزینه و طول عمر پنل است. در ایران، بیشترین استفاده از پنل‌های خورشیدی در سیستم‌های خانگی و کسب و کارهای کوچک و متوسط می‌باشد. در سیستم‌های خورشیدی برای تولید برق، انتخاب پنل به دلیل تأثیرات دما و رطوبت بر روی کارایی پنل، بسیار مهم است. در برخی نقاط ایران، هوای گرم و خشک در تابستان باعث کاهش کارایی پنل‌های خورشیدی می‌شود. بنابراین در این مناطق، انتخاب پنل‌هایی که عملکرد بهتری در شرایط دمایی بالا دارند، مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین، جهت و زاویه نصب پنل‌های خورشیدی نیز بر کارایی آنها تأثیرگذار است. جهت نصب پنل به سمت جنوب و زاویه نصب نسبت به سطح افقی، باتوجه به وسعت کشور ایران باید مورد بررسی قرار گیرد تا بهترین عملکرد را به دست آورد. جهت نصب پنل به سمت جنوب و زاویه نصب، برای یافتن بهترین عملکرد برای پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک یکی از زمینه‌های پژوهش خواهد بود. همچنین، نوع دیگری از پنل‌های خورشیدی، ترکیبی از پنل‌های فتوولتائیک و ترمیک هستند که هم‌زمان برای تولید برق و گرمایش آب استفاده می‌شوند. این نوع پنل‌ها نسبت به پنل‌های فتوولتائیک معمولی، کارایی بیشتری در شرایط دمایی بالا دارند. با توجه به مزایا و معایب هر نوع پنل و شرایط مختلف آب و هوایی در نقاط مختلف ایران، انتخاب پنل مناسب برای هر پروژه بسیار مهم است. علاوه بر آن، توجه به استانداردهای رسمی برای تولید و نصب پنل‌های خورشیدی و نیز نگهداری و تعمیر قابل اهمیت می‌باشد. در مورد مزایا و معایب انواع پنل‌های خورشیدی در جهان و ایران، باید گفت که هر نوع پنل خورشیدی مزایا و معایب خود را دارد. به عنوان مثال، پنل‌های خورشیدی فلزی از قیمت پایینی برخوردار هستند، اما دارای کارایی کمتر و حساس نسبت به دما می‌باشند. به عنوان مقابله با این معایب، پنل‌های خورشیدی پلیمری، گران‌تر و با کارایی بهتر در دماهای بالا هستند. دما نیز می‌تواند بر کارایی پنل‌های خورشیدی تأثیر بگذارد. با افزایش دما، کارایی پنل‌های خورشیدی کاهش می‌یابد. برای مثال، برخی مناطقی که در تابستان دما بسیار بالاست، کارایی پنل‌های خورشیدی پایین‌تر خواهد بود. باد نیز می‌تواند بر کارایی پنل‌های خورشیدی اثرگذار باشد. در صورتی که پنل‌های خورشیدی بیش از حد در معرض باد قرار گیرند، می‌تواند باعث خرابی آنها شود [۱۷-۱۹].

سؤالات پژوهش حاضر عبارتند از: زاویه بهینه جهت نصب پنل‌های خورشیدی در سقف ساختمان‌ها به منظور دریافت بیشترین انرژی سالانه در شهر ارومیه کدام است؟ عملکرد سقف شیبدار در سیستم BAPV چه تفاوتی با سیستم BIPV دارد؟ در این راستا، پژوهشگران مطالعات گسترده‌ای در رابطه با پنل‌های خورشیدی در سراسر جهان انجام داده‌اند که به تعدادی از آنها اشاره می‌شود.

یانگ^۱ و همکارانش طرحی مبتنی بر BIPV ارائه کردند که هزینه‌ها، مزایا و خطرات و موانع این سیستم را نسبت به BAPV سنجیدند و با در نظر گرفتن هزینه اولیه بالا برای BIPV به این نتیجه رسیدند که استفاده از BIPV می‌تواند مزایای بلندمدت قابل توجهی برای مشتریان و کاربران و کل جامعه داشته باشد [۲۰].

کومار^۲ و همکاران به مقایسه عملکرد سیستم‌های BAPV و BIPV با فناوری‌های فتوولتائیک c-Si، CIS و CdTe پرداختند که با توجه به اقلیم گرم مکان پژوهش انجام گرفته، ابتدا به تقسیم‌بندی انواع سیستم‌های خورشیدی پرداخته و سپس بسته به روش نصب پنل‌ها در ساختمان، عملکرد هر کدام از آنها را مورد بررسی و مقایسه و انرژی به دست آمده از هر کدام از آنها را در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار دادند [۱۶].

زومر^۳ و همکاران به ارزیابی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه BIPV در ساختمان سایه‌دار پرداختند. دیدگاه‌های معماری این پژوهش نشان می‌دهد که مدول‌های PV^۴ به عنوان پوسته یکپارچه‌سازی ساختمان مورد استفاده

¹ Yang

² Kumar

³ Zomer

⁴ Photovoltaic

قرار می‌گیرند، زیرا سیستم‌های BIPV می‌توانند حتی زمانی که در موقعیت ایده‌آل قرار نگیرند و تا حدی سایه‌دار باشند، به خوبی عمل کنند و طراحی سیستم الکتریکی کاملاً از تصمیم‌های معماری پشتیبانی می‌کند [۲۱].

لوپز-اسکالانت^۱ و همکاران مدول‌های فتوولتائیک طراحی شده برای یکپارچه‌سازی معماری بدون عواقب عملکرد منفی پیشنهاد دادند. این پژوهش الزامات معماری را فراتر از نصب ساده دستگاه‌های خورشیدی بر روی تراس می‌داند. بدین منظور، صفحه پستی سفید را با صفحه پستی سیاه و پوشش شیشه‌ای معمولی را با یک شیشه ضدانعکاس جایگزین می‌کند. در این صورت، مدول‌های PV به دست آمده، زیبایی بیشتری را در مقایسه با حالت قبلی بدون کاهش توان، نشان می‌دهند [۲۲].

آووکو^۲ و همکاران از منظر زیبایی‌شناسی در پذیرش فتوولتائیک یکپارچه ساختمان (BIPVs) پرداختند. این پژوهش به بررسی زیبایی‌شناسی در استفاده از سیستم‌های خورشیدی پرداخته است؛ چراکه زیبایی یک عامل مهم برای معماران و صاحبان خانه می‌باشد. از این رو، بررسی تمامی عناصر و اصول زیبایی‌شناسی در سیستم‌های BIPV مهم به نظر می‌رسد [۲۳].

مارتین-چیولت^۳ و همکاران به بررسی رفتار محصولات و سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه ساختمان (BIPV) پرداختند. این پژوهش ویژگی‌های اصلی سیستم‌های BIPV را بررسی کرده است. استانداردسازی مناسب برای ارزیابی انتقال حرارت و افزایش گرمای خورشیدی توسط مدول‌های BIPV نیاز به پیشرفت بیشتری خواهند داشت. زیرا عناصر BIPV با عناصر ساختمانی که جایگزین می‌شوند، رفتار متفاوتی دارند [۲۴].

چن^۴ و همکاران رویکردی جدید برای دیوارهای پیش‌ساخته BIPV برای ساختمان‌های چند طبقه ارائه دادند که این پژوهش، طراحی یک سیستم دیواری یکپارچه پیش‌ساخته BIPV را بر اساس فناوری پیش‌ساخته سازه فولادی سبک بررسی می‌کند. این محصول برای ساختمان‌های بلند مناسب بوده و امکان نصب محصول از داخل خانه به صورت دستی و بدون استفاده از داربست وجود دارد [۲۵].

پژوهش حاضر، به بررسی چالش‌های موجود و ارائه راهکار در جهت بهبود معماری ساختمان‌های دارای پنل خورشیدی با در نظر گرفتن بازدهی می‌پردازد. در این مقاله، ابتدا به مطالعه انواع سیستم‌های خورشیدی پرداخته شده و مقایسه‌ای بین میزان بازدهی، زیبایی و هزینه صورت گرفته است. از آنجایی که در ایران اکثر سقف‌ها به صورت افقی می‌باشد، پنل‌های خورشیدی به صورت ناهمگن در سقف‌ها چیده می‌شوند. از این رو چالش‌های موجود در طراحی ساختمان هنگام استفاده از سیستم‌های خورشیدی مورد بحث قرار گرفته و در نهایت راهکاری برای سقف در جهت بهبود بازدهی و زیبایی ساختمان ارائه شده است. لذا این مقاله به بررسی عملکرد سقف‌های افقی و شیب‌دار در دو سیستم BAPV و BIPV با انجام شبیه‌سازی‌ها جهت دستیابی به اطلاعات قابل استناد در شهر ارومیه می‌پردازد.

سیستم‌های BIPV و BAPV

ساختمان‌های آینده را می‌توان به عنوان نیروگاه‌های فتوولتائیک در نظر گرفت که به کمک پنل‌های خورشیدی، برق تولید می‌کنند. سیستم‌های فتوولتائیک، براساس تکنولوژی ساخت و نحوه نصب در ساختمان به دو دسته تقسیم شده‌اند [۱۶]. دسته اول که BAPVها هستند که در آنها پنل‌های خورشیدی بعد از ساخت به ساختمان اضافه می‌شوند [۲۶]. در این حالت، پنل‌های خورشیدی اثر مستقیمی در ساختار ساختمان ندارند؛ بلکه در یک زاویه خاص در سقف و یا نما متصل می‌گردند. آنها را می‌توان در سقف افقی و یا دیوار عمودی استفاده نمود [۲۷؛ ۲۸]. دسته دوم که BIPV

¹ Lopez-Escalante

² Awuku

³ Martin-Chivelet

⁴ Chen

نمیده می‌شود، در آن پنل‌های خورشیدی جزئی از ساختمان هستند و در هنگام ساخت به نما و یا سقف ساختمان اعمال می‌شوند [۲۹]. این ساختار پنل‌های خورشیدی، جایگزین ساختار سنتی استفاده شده در ساختمان برای سقف و یا دیوارها می‌باشند [۳۰]. از لحاظ تولید انرژی برای هر دو ساختار، سیستم BAPV تولید انرژی بهتری نسبت به سیستم BIPV دارد [۱۶]. جدول ۱ مقایسه انواع سیستم‌های فتوولتائیک را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه‌ی BAPV, BIPV [۳۱].

BIPV	BAPV
یکپارچه با سازه ساختمان که سقف یا نما هستند.	مجزا از سازه ساختمان
سبک و سنگین	سنگین
بادوام	شکستنی
مقاومت بالا در برابر باد	امکان بلند شدن و جابه‌جایی در برابر باد
از نظر ظاهری زیبا	از نظر ظاهری نامرتب
تولید انرژی سالانه سیستم‌های BIPV ۴۳۶۸۰ کیلووات ساعت در سال [۱۶]	تولید انرژی سالانه سیستم‌های BAPV ۴۵۳۹۰ کیلووات ساعت در سال [۱۶]

چالش‌های موجود در طراحی معماری ساختمان در استفاده از پنل‌های خورشیدی

بازدهی، زیبایی و هزینه فاکتورهای کلیدی مصرف‌کننده‌ها در انتخاب یک محصول هستند. بسیاری از محققان بر این باورند که استفاده از پنل‌های خورشیدی به دلیل مسائلی چون هزینه، زیبایی، مسائل فرهنگی، اجتماعی و روان‌شناختی زیاد رواج نیافته است [۳۲؛ ۳۳]. گرچه مقالاتی شامل مسائل اساسی را در انتخاب سیستم‌های خورشیدی مورد مطالعه قرار دادند؛ ولی سیستم‌های خورشیدی در طراحی معماری ساختمان همچنان با این چالش‌ها مواجه بوده‌اند.

زیبایی

عناصر و اصول طراحی می‌توانند زیبایی را در یک محصول ایجاد کنند و به عنوان پایه و اساسی برای طراحی سیستم‌های خورشیدی به کار روند. عناصر طراحی شامل رنگ، شکل و بافت هستند. شکل ۱ شکل‌های مختلف پنل‌های خورشیدی را نشان می‌دهد. علاوه بر آن اصول طراحی شامل تنوع، تعادل، ریتم، تاکید، کنتراست و تناسب هستند. توجه به این عناصر و اصول در طراحی سیستم‌های خورشیدی می‌تواند باعث زیبایی و در نتیجه جلب نظر مشتری شود که میزان استفاده مصرف‌کنندگان از آنها جهت تولید برق افزایش یابد [۳۴].



شکل ۱. شکل‌های مختلفی از پنل‌های خورشیدی [۲۳].

بازدهی

باتوجه به تفاوت در شکل و ساختار BAPV و BIPV، استفاده از BIPV نسبت به BAPV مزایای نسبی دارد و با در نظر گرفتن مطالب ارائه شده، بازدهی BIPV بین ۱ تا ۴ درصد کمتر از BAPV است [۱۶]. بنابراین در استفاده از هر کدام از سیستم‌ها، طراح ساختمان با توجه به اولویت‌های خود باید تعادلی بین زیبایی و بازدهی ایجاد کرده و آن ویژگی را که اهمیت بیشتری از نظر طراح دارد، مورد توجه قرار دهد. در واقع انتخاب بین هر کدام از سیستم‌ها و یا ترکیبی از آنها به عنوان یک چالش طراحی در برابر طراح خواهد بود تا نسبت به انتخاب مناسب اقدام کند.

هزینه

از دهه ۱۹۸۰، قیمت پنل‌های خورشیدی ده برابر کاهش یافته است و از ۳۰ دلار به ازای هر وات به ۳ دلار در وات رسیده است [۳۴]. کاهش سریع قیمت مواد پنل خورشیدی در سال‌های اخیر منجر به کاهش قیمت پنل‌های BIPV شده است [۳۵؛ ۳۶]. که این کاهش قیمت منجر به حجم تولید، به افزایش کاربدها و بهبود فناوری پنل خورشیدی می‌شود [۳۷؛ ۳۸]. در ایران در سال ۱۴۰۱، با استعلام از شرکت‌های معتبر قیمت پنل‌های خورشیدی به ازای هر وات حدود ۰.۴ دلار است.

در آخرین تحقیقات انجام شده هزینه تولید برق خورشیدی ۱/۵ برابر برق تولیدی ناشی از سوخت فسیلی می‌باشد [۳۷]. بنابراین با پیشرفت هر روز در تکنولوژی ساخت، هزینه تولید به سرعت در حال کاهش است جدول ۲، به مقایسه‌ای بر هزینه و درآمد پنل‌های استفاده شده در BIPV می‌پردازد. برای سهولت مقایسه، تمام هزینه‌ها در بررسی به دلار آمریکا تبدیل شده است [۲۰].

جدول ۲. هزینه هر واحد با توجه به مطالعات قبلی [۲۰].

کشور	سال	نویسنده	ظرفیت انتقال انرژی (kWp ^۱)	هزینه W/S	نوع
استرالیا	۲۰۰۹	تیمیناگا ^۲ [۳۵]	۶۵۸	۲۳	مدول سقف
یونان	۲۰۰۳	باکوس ^۳ و همکاران [۳۹]	۲.۲۵	۱۴.۴	مدول سقف
ایتالیا	۲۰۱۲	کوپچیا ^۴ و همکاران [۴۰]	۱۱.۵۲	۱۱.۶	مدول سقف
اروپا	۲۰۱۰	پاگلیارو ^۵ و همکاران [۴۱]	۳	۱۰.۸	مدول سقف
کلمبیا	۲۰۱۱	آریستیزبال ^۶ و همکاران [۴۲]	۰.۸۴	۱۰.۳۱	مدول سقف
مالزی	۲۰۱۲	رحمن ^۷ و همکاران [۴۳]	۵.۷۶	۸.۵	مدول سقف
هند	۲۰۰۹	چل ^۸ و همکاران [۴۴]	۲.۳	۷.۲	مدول سقف

¹ Kiloowatt peak

² Tominaga

³ Bakos

⁴ Cucchiella

⁵ Pagliaro

⁶ Aristizábal

⁷ Rahman

⁸ Chel

مشکلات

ایران به داشتن معماری غنی و پاسخ‌های معماری هم‌سو با طبیعت در طول تاریخ مطرح بوده است. علی‌رغم دارا بودن الگوهای مناسب در این راستا، یکی از معضلات کشور، افزایش مصرف انرژی می‌باشد [۴۵]. در ایران با توجه به اینکه هزینه برق مصرفی ارزان‌تر از هزینه تولید آن است (به دلیل پرداخت یارانه توسط دولت)، لذا استفاده از پنل‌های خورشیدی در مناطق شهری مرسوم نبوده و صرفاً در مناطق خارج از شهر و دور از شبکه برق استفاده شده‌اند. استفاده از پنل‌های خورشیدی در ایران صورت BAPV بوده که این نوع استفاده، باعث ناهمگنی در ظاهر ساختمان و زیبایی آن شده است. همچنین معماری نقاط شهری اغلب به گونه‌ای می‌باشد که فضای باز در اطراف ساختمان‌ها (برخلاف ساختمان‌های موجود در کشورهای مدرن) وجود ندارد. از این‌رو نیاز است که راهکارهایی توسط معماران و مهندسان در راستای بهبود استفاده از سیستم‌های خورشیدی به منظور دریافت بازدهی بیشتر در عین زیبایی ارائه شود. همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد اغلب پنل‌های خورشیدی نصب شده در شهر ارومیه، به صورت ناهمگن در پشت بام چیده شده‌اند.



شکل ۲. آشفته‌گی سقف ساختمان‌های دارای پنل‌های خورشیدی در ایران؛ منبع: نگارندگان.

در مجموع، هزینه استفاده از پنل‌های خورشیدی در مقایسه با برق شبکه در ایران زیاد است، تعرفه برق شبکه برای مصارف خانگی بین ۲۰ ریال تا ۱۵۰۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت برای نقاط مختلف کشور متغیر می‌باشد. این درحالی است که اگر عمر مفید سیستم خورشیدی متصل به شبکه ۳۰ سال در نظر گرفته شود، هزینه هر کیلووات ساعت حدوداً ۶۶۰۰ ریال خواهد بود. با وجود هزینه زیاد سیستم خورشیدی می‌توان با افزایش بازدهی توسط نحوه قرارگیری در ساختمان‌ها و افزایش زیبایی با ایجاد عناصر طراحی و رعایت اصول معماری، چالش هزینه را از دید مصرف‌کنندگان کم‌رنگ‌تر نمود. علاوه بر آن سیستم خورشیدی می‌تواند جایگزین عناصر ساختمان شده و در پوشش و ساختار معماری ادغام شود [۴۶]. در ساختمان‌های ایران، فضاهای سقف و نما و بالکن‌ها پتانسیل بالقوه‌ای در جهت اجرای طرح‌های معماری مناسب به منظور تولید انرژی خورشیدی دارند که در پژوهش حاضر به ارائه راهکار برای طراحی سقف‌های عموم بناهای دارای سیستم‌های خورشیدی پرداخته می‌شود.

روش تحقیق

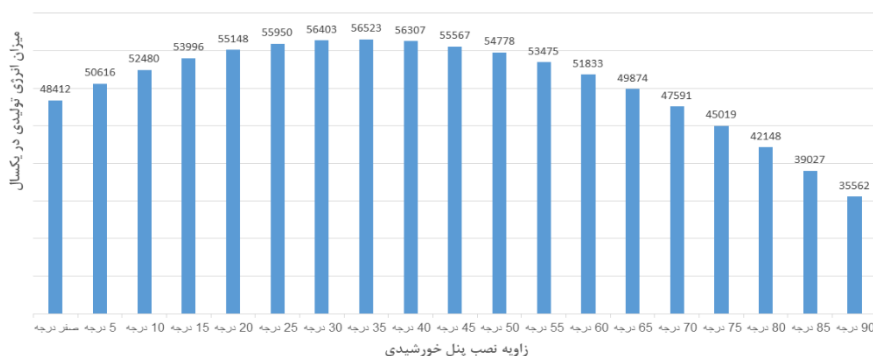
پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی و دارای رویکرد کمی است که با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای به بررسی چالش‌های موجود در ساختمان‌های دارای سیستم‌های خورشیدی می‌پردازد. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار PVsyst ۷.۲، شبیه‌سازی یک سیستم خورشیدی نمونه با پنل مدل REC۳۹۰tp۲۵M۷۲ شرکت REC برای هر دو سیستم BAPV و BIPV در شهر ارومیه با زوایای نصب مختلف انجام گرفت تا بتوان زاویه‌ای که در آن سیستم خورشیدی بیشترین بازدهی سالانه را دارد، به دست آید. همچنین عملکرد سقف‌های افقی و شیب‌دار دارای سیستم‌های خورشیدی BAPV و BIPV با انجام شبیه‌سازی جداگانه برای هر کدام مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و در نهایت میزان اتلاف انرژی و مساحت در دسترس هر دو سقف در هر دو سیستم‌های خورشیدی به دست آمد.

راهکار پیشنهادی برای سقف ساختمان‌ها

جهت بررسی تأثیر شیبدار کردن سقف در بازدهی پنل‌ها نیاز است تا بازدهی پنل‌های خورشیدی را با زوایای نصب مختلف به دست آورد. همچنین نیاز است تا تأثیر عوامل مختلف در بازدهی پنل‌ها بررسی شود.

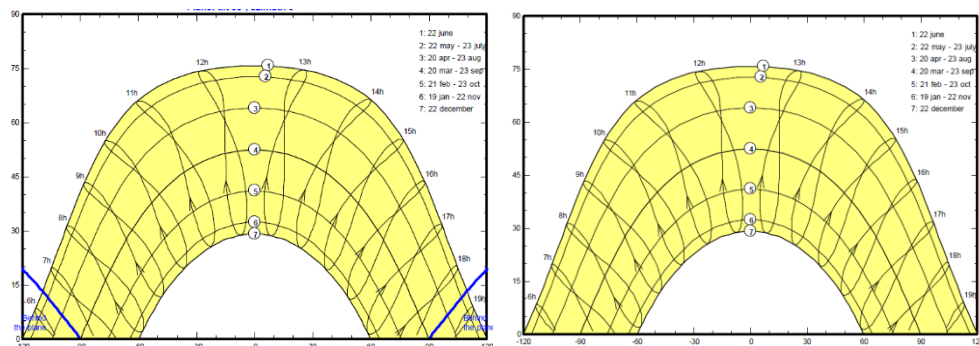
بررسی بازدهی پنل‌های نصب شده در سقف‌ها با زوایای مختلف

گرچه پنل‌های خورشیدی به شکل‌های مختلف در ساختمان‌ها نصب می‌شوند؛ ولی می‌توان شیب سقف‌ها را طوری تنظیم کرد که بتوان بیشترین بازدهی را از پنل‌های خورشیدی دریافت نمود. برای بررسی این موضوع، یک ساختمان ویلا با مساحت سقف ۱۵۰ مترمربع در شهر ارومیه برای تمامی ماه‌ها در نظر گرفته شده است. در این راستا، برای سیستم BAPV و BIPV از پنل مدل REC۳۹۰tp۲۵M۷۲ شرکت Rec که توان تولیدی آن ۳۹۰ وات است، استفاده می‌شود (در سیستم BIPV ترکیب پنل مدل REC۳۹۰tp۲۵M۷۲ شرکت Rec با کیت‌های سقف شرکت Solarif در نظر گرفته شده است) [۴۷]. این پنل دارای ابعاد $۲۰۰۵ \times ۱۰۰۱ \times ۳۰$ میلی‌متر و وزن آن به طور متوسط ۲۲ کیلوگرم است. جهت انجام این کار با دادن اطلاعات مربوط به مساحت و نیز توان پنل به نرم‌افزار PVsyst ۲ و انجام شبیه‌سازی، میزان پنل مورد نیاز جهت جانمایی در فضای فوق و نیز انرژی تولیدی مجموعه پنل‌ها، توسط نرم‌افزار به دست آمد. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تعداد ۷۶ پنل مورد نیاز است که فضایی ۱۵۳ مترمربع را اشغال خواهند کرد. شکل ۳ میزان انرژی سالانه تولیدی را با زوایای مختلف سقف نشان می‌دهد.



شکل ۳. میزان انرژی تولیدی در سال با زوایای مختلف سقف دارای پنل‌های خورشیدی؛ منبع: نگارندگان.

شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش زاویه از صفر، میزان برق تولیدی افزایش می‌یابد و در زاویه ۳۵ درجه به بیشترین مقدار خود می‌رسد و پس از آن شروع به کاهش می‌کند. بنابراین زاویه بهینه ۳۵ درجه از روی نمودار به دست می‌آید.



شکل ۴. وضعیت خط افق و زاویه تابش خورشید. سمت چپ: سقف افقی، سمت راست: سقف شیبدار با زاویه ۳۵ درجه؛ منبع: نگارندگان.

همان طوری که مشاهده می‌شود بیشترین زاویه آزمون ۱۲۰ درجه در تابستان و کمترین آن ۶۰ درجه در زمستان است.

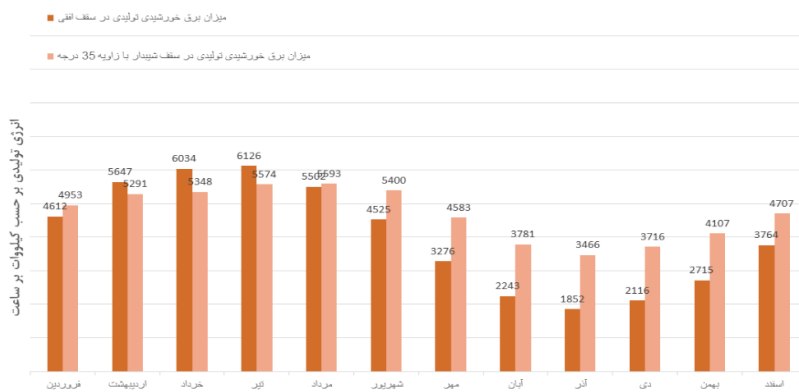
سیستم خورشیدی BAPV در زاویه صفر درجه (سقف افقی) در طی یک سال ۴۸۴۱۲ کیلووات‌ساعت انرژی تولید خواهد کرد. با در نظر گرفتن تلفات انرژی، این میزان انرژی برای مصرف ۸ واحد آپارتمانی به شرح زیر در طی یک سال مناسب است.

جدول ۳. الگوی مصرف روزانه در یک ساختمان؛ منبع: نگارندگان.

دستگاه	تعداد	قدرت	استفاده روزانه h/day	انرژی روزانه wh	ساعت کارکرد در شبانه‌روز
لامپ	۱۰	۱۰	۵	۸۰۰	۱۹-۲۴
تلویزیون/کامپیوتر/موبایل	۱	۱۰۰	۵	۸۰۰	۸-۱۰ ۲۰-۲۳
لوازم خانگی	۱	۸۰۰	۴	۳۲۰۰	۸-۱۰ ۲۰-۲۲
یخچال/فریزر	۱	۲۵۰	۲۴ (۸ ساعت موتور روشن)	۲۰۰۰	۲۴ ساعت
ماشین لباسشویی و ظرفشویی	۱	۱۰۰۰	۲	۲۰۰۰	۷-۹
تهویه	۱	۱۰۰	۱۲	۱۲۰۰	۹-۲۱
گرمایش/سرمایش	۱	۱۰۰۰	۳	۳۰۰۰	۱۲-۱۵
سایر مصارف	-	۱۰۰	۲۴	۲۴۰۰	-
کل انرژی روزانه				۱۵۴۰۰ Wh	
کل انرژی سالانه				۵۶۲۱ kWh	

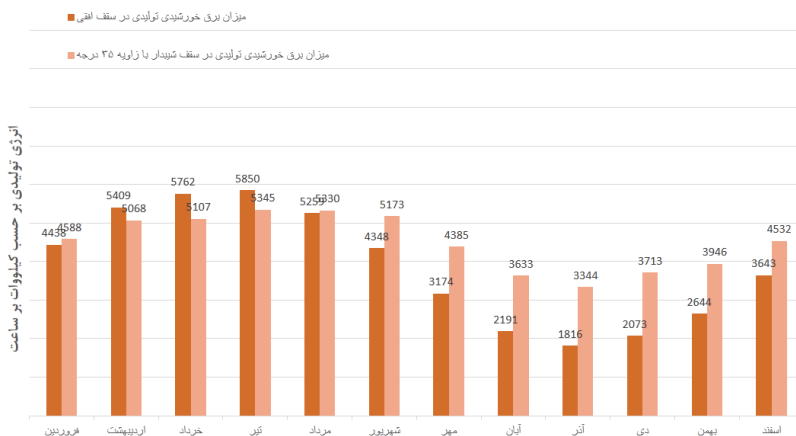
باتوجه به این‌که انرژی مصرفی هر واحد ۵۶۲۱ کیلووات‌ساعت است، برای مصرف ۸ واحد ۴۴۹۶۸ کیلووات‌ساعت انرژی در سال موردنیاز خواهد بود.

بار دیگر برای بررسی میزان تولید انرژی سیستم BAPV، همین تعداد پنل در یک سقف شیبدار با زاویه ۳۵ درجه، با انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار PVsyst۷.۲ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در این حالت، میزان برق تولیدی سالیانه ۵۶۵۲۳ کیلووات‌ساعت در سال است و با در نظر گرفتن تلفات انرژی، این میزان انرژی، برای بیشتر از مصرف ۸ واحد آپارتمانی به شرح جدول ۳ در طی یک سال مناسب خواهد بود. به عبارت دیگر، میزان تولید انرژی سیستم BAPV در حالت سقف شیبدار با زاویه ۳۵ درجه نسبت به حالت سقف افقی ۱۶ درصد افزایش یافته است (شکل ۵).



شکل ۵. میزان برق خورشیدی تولیدی در سقف افقی و در سقف شیبدار با زاویه ۳۵ درجه در سیستم BAPV؛ منبع: نگارندگان.

بررسی سیستم خورشیدی BIPV در زاویه صفر درجه (سقف افقی) نشان دارد که در طی یک سال ۴۶۶۰۷ کیلووات‌ساعت انرژی تولید می‌کند و این میزان، در مقایسه با BAPV، ۳.۷ درصد کمتر است. برای بررسی میزان تولید انرژی در سیستم BIPV در یک سقف شیبدار با زاویه ۳۵ درجه، شبیه‌سازی در نرم‌افزار PVsyst۷.۲ انجام شد. نتایج شبیه‌سازی در این حالت نشان می‌دهد که میزان برق تولیدی سالیانه ۵۴۱۶۴ کیلووات‌ساعت در سال است که در مقایسه با سیستم BAPV، ۴.۱ درصد کمتر می‌باشد. به عبارت دیگر، میزان تولید انرژی سیستم BIPV در حالت سقف شیبدار با زاویه ۳۵ درجه نسبت به حالت سقف افقی ۱۴ درصد افزایش یافته است (شکل ۶).

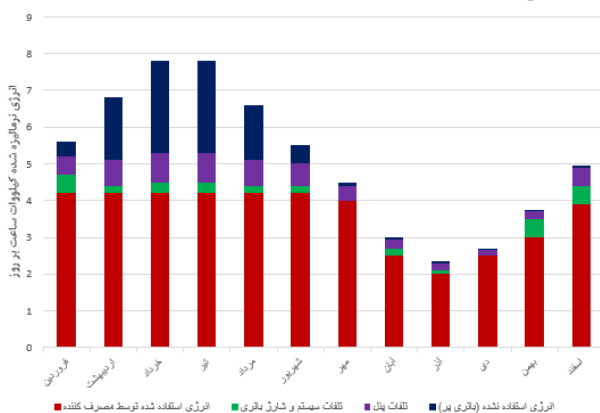


شکل ۶. میزان برق خورشیدی تولیدی در سقف افقی و در سقف شیبدار با زاویه ۳۵ درجه در سیستم BIPV:

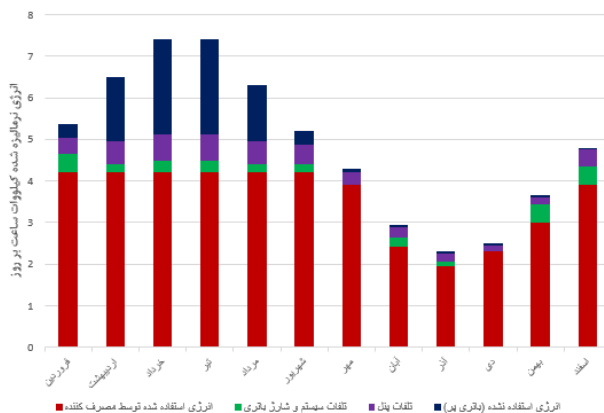
منبع: نگارندگان.

بررسی تأثیر الگوی مصرف در استفاده از انرژی در دسترس

شبه‌سازی‌های انجام گرفته، انرژی تولیدی قابل دسترس پنل‌های خورشیدی در دو سیستم BAPV و BIPV را نشان می‌دهند. برای بررسی امکان مصرف این میزان انرژی برای مجتمع‌های مسکونی با مصارف گوناگون به بررسی بیشتر نتایج به دست آمده از شبه‌سازی پرداخته می‌شود. شکل‌های ۷ تا ۱۰، نمودار انواع انرژی نرمالیزه شده (به ازای هر کیلووات پنل) را در دو سیستم BAPV و BIPV برای دو سقف افقی و شیبدار با زاویه ۳۵ درجه را نشان می‌دهند. شکل‌های زیر نشان می‌دهند که در شش ماهه دوم سال انرژی تولیدی از میزان نیاز کمتر است و در نتیجه مصرف‌کننده با مشکل کمبود انرژی مواجه خواهد شد. با وجود این که توان تولیدی پنل‌ها از نیاز سالانه بیشتر است، در سقف با زاویه صفر درجه (سقف افقی) امکان استفاده کامل از انرژی در تمام روزهای سال مقدور نخواهد بود. در این صورت امکان تأمین برق کامل ۸ واحد وجود نخواهد داشت. در واقع بخشی از انرژی به دلایل مختلفی از جمله تلفات به دلیل دما و تلفات اهمی و تلفات اینورتر و نیز پر بودن باتری‌ها و ... از دست داده شده است. همچنین در شش ماهه اول سال میزان انرژی در دسترس بیشتر از نیاز می‌باشد و در نتیجه به دلیل پر بودن باتری‌ها این میزان انرژی بلا استفاده مانده است. بنابراین در حالت سقف افقی ۲۳.۵ درصد از انرژی در دسترس استفاده نشده است (شکل‌های ۷ و ۸).

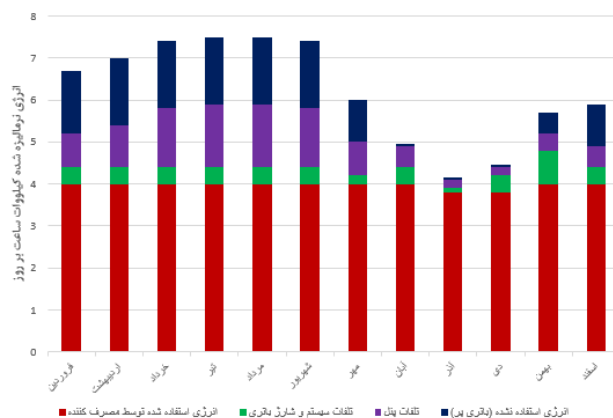


شکل ۷. انواع انرژی نرمالیزه شده برای سقف افقی در سیستم BAPV؛ منبع: نگارندگان.

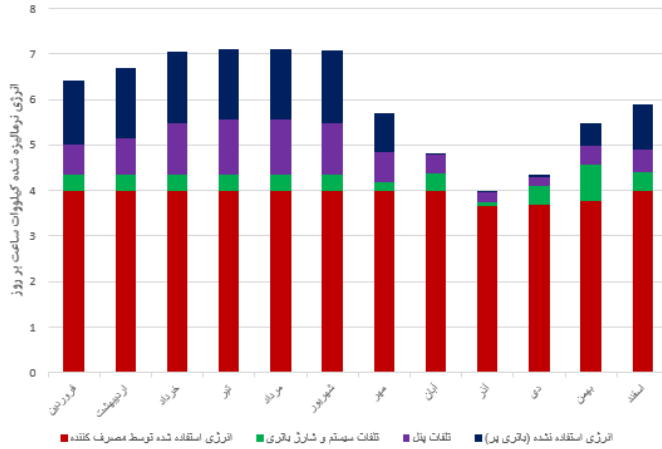


شکل ۸. انواع انرژی نرمالیزه شده برای سقف افقی در سیستم BIPV؛ منبع: نگارندگان.

همان‌طور که از شکل‌های ۹ و ۱۰ مشخص است در هیچ‌یک از ماه‌ها کمبود انرژی تولیدی وجود ندارد. همچنین در ۸ ماه از سال میزان انرژی در دسترس بیشتر از نیاز می‌باشد و در نتیجه به دلیل پر بودن باتری‌ها این میزان انرژی بلا استفاده مانده است. بنابراین در حالت سقف شیب‌دار با زاویه ۳۵ درجه، ۲۰ درصد از انرژی در دسترس، بلا استفاده مانده است.



شکل ۹. انواع انرژی نرمالیزه شده برای سقف شیب‌دار با زاویه ۳۵ درجه در سیستم BAPV؛ منبع: نگارندگان.

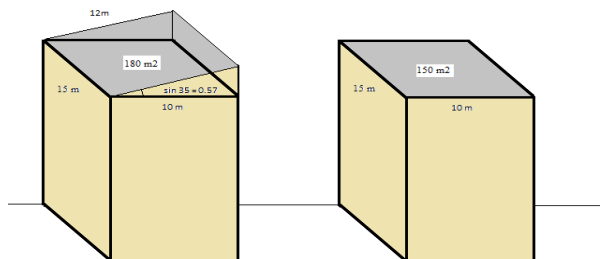


شکل ۱۰. انواع انرژی نرمالیزه شده برای سقف شیبدار با زاویه ۳۵ درجه در سیستم BIPV: منبع: نگارندگان.

با توجه به بررسی‌های انجام گرفته، میزان انرژی استفاده نشده در سقف‌های شیبدار با زاویه ۳۵ درجه با در نظر گرفتن الگوی مصرف در سیستم‌های BAPV و BIPV، ۳/۵ درصد کمتر از سقف‌های افقی است.

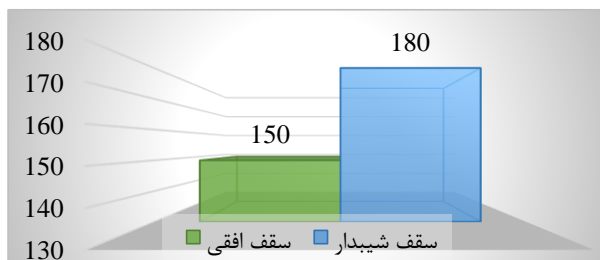
بررسی مساحت در دسترس در سقف‌های با زوایای مختلف جهت نصب پنل‌ها در سیستم‌های BIPV و BAPV

شکل ۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی پنل‌ها در زاویه صفر و ۳۵ درجه برای ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سقف‌های افقی در تابستان میزان انرژی تولیدی تقریباً برابر و در سایر فصل‌ها کاهش یافته است. همچنین میزان تولید انرژی در سقف‌های شیبدار در سیستم BAPV ۱۶ درصد و در سیستم BIPV ۱۴ درصد افزایش یافته است. اگر از سقف شیبدار استفاده شود، با در نظر گرفتن زاویه ۳۵ درجه، میزان مساحت قابل دسترس به ۱۸۰ مترمربع افزایش خواهد یافت. شکل ۱۱ تفاوت فضای دسترس دو ساختمان را نشان می‌دهد.

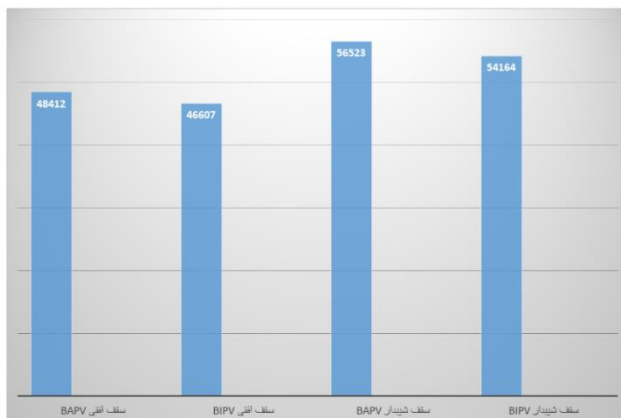


شکل ۱۱. تفاوت فضای قابل دسترس در ساختمان با سقف افقی و ساختمان با سقف شیبدار ۳۵ درجه؛ منبع: نگارندگان.

در واقع با شیبدار کردن سقف با زاویه ۳۵ درجه، علاوه بر افزایش بازدهی در تعداد پنل مساوی، فضای مورد نیاز نیز افزایش می‌یابد و قابلیت نصب پنل‌ها بیشتر می‌شود. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مقایسه بازدهی و مساحت در دسترس را در دو ساختمان موردنظر نشان می‌دهند.



شکل ۱۲. مساحت در دسترس جهت نصب پنل‌ها (مترمربع)؛ منبع: نگارندگان.



شکل ۱۳. میزان برق تولیدی سالانه با تعداد پنل یکسان (KW/h)، منبع: نگارندگان.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به چالش‌های موجود در ساختمان‌های دارای پنل‌های خورشیدی پرداخته شد. بررسی مطالعات انجام گرفته نشان داد که استفاده از سیستم‌های BIPV در مقایسه با BAPV بازدهی را ۱ تا ۴ درصد کاهش می‌دهد و در عین حال هزینه بیشتری نیز دارد. از طرفی چون زیبایی و جلوه ساختمان را بهبود می‌بخشد؛ استفاده از آن برای مصرف‌کنندگان توجیه‌پذیر است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار PVsyst ۲، شبیه‌سازی یک سیستم خورشیدی نمونه برای هر دو سیستم BAPV و BIPV در شهر ارومیه با زوایای نصب مختلف انجام گرفت تا بتوان زاویه‌ای که در آن سیستم خورشیدی بیشترین بازدهی سالانه را دارد، به دست آید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار PVsyst ۲ نشان داد که در سقف شیبدار با زاویه ۳۵ درجه بیشترین بازدهی سالانه را از سیستم خورشیدی می‌توان دریافت کرد. علاوه بر آن عملکرد سقف‌های افقی و شیبدار در دو سیستم BAPV و BIPV مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه بازدهی پنل‌ها در سقف شیبدار با زاویه ۳۵ درجه و سقف افقی مشخص گردید که با تعداد پنل یکسان، بازدهی پنل‌ها در سقف شیبدار در سیستم BAPV، ۱۶ درصد و در سیستم BIPV، ۱۴ درصد نسبت به سقف افقی بیشتر است. میزان انرژی استفاده نشده در سقف‌های شیبدار با زاویه ۳۵ درجه با در نظر گرفتن الگوی مصرف در سیستم‌های BAPV و BIPV، ۳/۵ درصد کمتر از سقف‌های افقی می‌باشد. همچنین با شیبدار کردن سقف با زاویه ۳۵ درجه، علاوه بر افزایش بازدهی در تعداد پنل مساوی، فضای مورد نیاز نیز جهت استفاده از پنل‌های خورشیدی ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین با اعمال روش‌های نوین در طراحی ساختمان‌ها و تلاش برای شیبدار نمودن سطوح، می‌توان بازدهی بیشتر و اتلاف انرژی کمتر را از سیستم‌های خورشیدی در عین معماری زیبا و بهینه دریافت کرد.

بررسی طرح‌هایی برای زاویه‌دار کردن نما و بالکن ساختمان و ارزیابی تأثیرات آن بر روی بازدهی پیشنهادی برای پژوهش‌های آتی است.

References

- [1] Shubbak, M. H. (2019). The technological system of production and innovation: The case of photovoltaic technology in China. *Research Policy*, 48(4), 993-1015. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.10.003>
- [2] Kumar, N. M., Das, P., & Krishna, P. R. (2017, July 6-7). *Estimation of grid feed in electricity from roof integrated Si-amorph PV system based on orientation, tilt and available roof surface area*. 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies, Kerala, India. <https://doi.org/10.1109/ICICT1.2017.8342629>
- [3] Williams, F. (2016). Critical Thinking in Social Policy: The Challenges of Past, Present and Future. *Social Policy & Administration*, 50(6), 628-647. <https://doi.org/10.1111/spo.1.12253>
- [4] Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>
- [5] Reichelstein, S., & Yorston, M. (2013). The prospects for cost competitive solar PV power. *Energy Policy*, 55, 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.11.003>
- [6] Weber, R. E., Mueller, C., & Reinhart, C. (2022). Solar exoskeletons – An integrated building system combining solar gain control with structural efficiency. *Solar Energy*, 240, 301-314. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.048>
- [7] Shayanian, A., Mozaffari Qhadikolaei, F., & Pahlavan, A. (2022). The Effect of Materials in Reducing Energy Consumption in Atrium Commercial Centers in the North and Center of Tehran Province. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(4), 429-440. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.281281.1482>
- [8] Shukla, K. N., Rangnekar, S., & Sudhakar, K. (2015). A comparative study of exergetic performance of amorphous and polycrystalline solar PV modules. *International Journal of Exergy*, 17(4), 433-455. <https://doi.org/10.1504/ijex.2015.071559>
- [9] Dusonchet, L., & Telaretti, E. (2015). Comparative economic analysis of support policies for solar PV in the most representative EU countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 986-998. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.054>
- [10] Shukla, K., Sudhakar, K., & Rangnekar, S. (2015). Estimation and validation of solar radiation incident on horizontal and tilted surface at Bhopal, Madhya Pradesh, India. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 15(1), 129-139. <https://doi.org/10.5829/idosi.ajeaes.2015.15.1.12517>
- [11] Prasad, D., & Snow, M. (2014). *Designing with solar power: a source book for building integrated photovoltaics (BiPV)*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315065731>
- [12] Huo, M-l., & Zhang, D-W. (2012). Lessons from photovoltaic policies in China for future development. *Energy Policy*, 51, 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.063>
- [13] Keskin, B. (2018, July 23). *What is Solar Energy and How Do Solar Panels Work?* Nanoteslab. <http://www.nanoteslab.com/project/solar-eneqy-and-panels/>
- [14] Charalambous, P. G., Maidment, G. G., Kalogirou, S. A., & Yiakoumetti, K. (2007). Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review. *Applied Thermal Engineering*, 27(2-3), 275-286. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.06.007>

- [15] Grätzel, M. (2001). Photoelectrochemical cells. *Nature*, 414(6861), 338-344. <https://doi.org/10.1038/35104607>
- [16] Kumar, N. M., Sudhakar, K., & Samykano, M. (2019). Performance comparison of BAPV and BIPV systems with c-Si, CIS and CdTe photovoltaic technologies under tropical weather conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100374. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.100374>
- [17] Vafaei, R., & Pourdeihimi, S. (2015). Estimating Solar Radiation on Building-Integrated Photovoltaic Systems. *Soffeh*, 25(2), 19-36. https://soffeh.sbu.ac.ir/article_100251.html?lang=en
- [18] Hoseinzadeh, P., Khalaji Assadi, M., Heidari, S., Khalatbari, M., Saidur, R., Haghghat nejad, K., & Sangin, H. (2021). Energy performance of building integrated photovoltaic high-rise building: Case study, Tehran, Iran. *Energy and Buildings*, 235(2), 110707. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110707>
- [19] Vafaei, R. (2009). Designing Building-Integrated Photovoltaic Systems. *Soffeh*, 18(1), 70-80. https://soffeh.sbu.ac.ir/article_100115.html?lang=en
- [20] Yang, R. J., & Zou, P. X. W. (2016). Building integrated photovoltaics (BIPV): costs, benefits, risks, barriers and improvement strategy. *International Journal of Construction Management*, 16(1), 39-53. <https://doi.org/10.1080/15623599.2015.1117709>
- [21] Zomer, C., Custódio, I., Antonioli, A., & Rüther, R. (2020). Performance assessment of partially shaded building-integrated photovoltaic (BIPV) systems in a positive-energy solar energy laboratory building: Architecture perspectives. *Solar Energy*, 211, 879-896. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.026>
- [22] López-Escalante, M. C., Navarrete-Astorga, E., Gabás Perez, M., Ramos- Barrado, J. R., & Martín, F. (2020). Photovoltaic modules designed for architectural integration without negative performance consequences. *Applied Energy*, 279, 115741. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115741>
- [23] Awuku, S. A., Bennadji, A., Muhammad-Sukki, F., & Sellami, N. (2021). Myth or gold? The power of aesthetics in the adoption of building integrated photovoltaics (BIPVs). *Energy Nexus*, 4(4), 100021. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100021>
- [24] Martín-Chivelet, N., Kapsis, K., Wilson, H. R., Delisle, V., Yang, R., Olivieri, L., Polo, J., Eisenlohr, J., Roy, B., Maturi, L., Otnes, G., Dallapiccola, M., & Upalakshi Wijeratne, W. M. P. (2022). Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) products and systems: A review of energy-related behavior. *Energy and Buildings*, 262, 111998. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111998>
- [25] Chen, T., Tai, K. F., Raharjo, G. P., Heng, C. K., & Leow, S. W. (2023). A novel design approach to prefabricated BIPV walls for multi-storey buildings. *Journal of Building Engineering*, 63, 105469. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2022.105469>
- [26] Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A., Shahrestani, M., Yao, R., Shao, L., Essah, E., Oliveira, A. C., Del Caño, T., Rico, E., Lechón, J. L., Andrade, L., Mendes, A., & Atli, Y. B. (2017). A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(3), 833-858. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2017.01.009>
- [27] Kumar, N. M., Navothna, B., & Minz, M. (2017, August 17-19). *Performance comparison of building integrated multi-wattage photovoltaic generators mounted vertically and horizontally*. 2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation, Bengaluru, India. <https://doi.org/10.1109/SmartTechCon.2017.8358345>

- [28] Kumar, N. M., Sudhakar, K., & Samykano, M. (2018). Performance of thin-film BIPV as double sloped pitched roof in buildings of Malaysia. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40(20), 2476-2484. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1502847>
- [29] Baljit, S. S. S., Chan, H-Y., & Sopian, K. (2016). Review of building integrated applications of photovoltaic and solar thermal systems. *Journal of Cleaner Production*, 137, 677-689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.150>
- [30] Tripathy, M., Sadhu, P. K., & Panda, S. K. (2016). A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 451-465. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.008>
- [31] The Building Integrated Photovoltaic Company. (2022). *Index Page - BiPVco -The Building Integrated Photovoltaic company*. <https://bipvco.com/>
- [32] Heinstein, P., Ballif, C., & Perret-Aebi, L-E. (2013). Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths. *Green*, 3(2), 125-156. <https://doi.org/10.1515/green-2013-0020>
- [33] Curtius, H. C. (2018). The adoption of building-integrated photovoltaics: barriers and facilitators. *Renewable Energy*, 126, 783-790. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.001>
- [34] Sharma, N., Varun, & Siddhartha. (2012). Stochastic techniques used for optimization in solar systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1399-1411. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.019>
- [35] Tominaga, M. (2009). *Opportunities for thin film photovoltaics in Building Integrated Photovoltaics (BIPV) with a focus on Australia* [Master, Murdoch University]. Perth, Australia. https://researchportal.murdoch.edu.au/esploro/outputs/graduate/Opportunities-for-thin-film-photovoltaics-in/991005544329207891?skipUsageReporting=true&skipUsageReporting=true&recordUsage=false&recordUsage=false&institution=61MUN_INST
- [36] Hammond, G. P., Harajli, H. A., Jones, C. I., & Winnett, A. B. (2012). Whole systems appraisal of a UK Building Integrated Photovoltaic (BIPV) system: Energy, environmental, and economic evaluations. *Energy Policy*, 40(1), 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.048>
- [37] Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2016). Exergetic analysis of building integrated semitransparent photovoltaic module in clear sky condition at Bhopal India. *Case Studies in Thermal Engineering*, 8, 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.06.009>
- [38] Bizzarri, G., Gillott, M., & Belpoliti, V. (2011). The potential of semitransparent photovoltaic devices for architectural integration: The development of device performance and improvement of the indoor environmental quality and comfort through case-study application. *Sustainable Cities and Society*, 1(3), 178-185. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2011.07.003>
- [39] Bakos, G. C., Soursos, M., & Tsagas, N. F. (2003). Technoeconomic assessment of a building-integrated PV system for electrical energy saving in residential sector. *Energy and Buildings*, 35(8), 757-762. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00229-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00229-3)
- [40] Cucchiella, F., D'Adamo, I., Gastaldi, M., & Koh, S. C. L. (2012). Renewable energy options for buildings: Performance evaluations of integrated photovoltaic systems. *Energy and Buildings*, 55, 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.029>

- [41] Pagliaro, M., Ciriminna, R., & Palmisano, G. (2010). BIPV: merging the photovoltaic with the construction industry. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 18(1), 61-72. <https://doi.org/10.1002/pip.920>
- [42] Aristizábal, A. J., Banguero, E., & Gordillo, G. (2011). Performance and economic evaluation of the first grid-connected installation in Colombia, over 4 years of continuous operation. *International Journal of Sustainable Energy*, 30(1), 34-46. <https://doi.org/10.1080/1478646X.2010.489948>
- [43] Rahman, M., Haur, L., & Rahman, H. (2012). Building integrated photovoltaic (BIPV) in Malaysia: an economic feasibility study. *Elixir Finance*, 45, 7683-7688. <https://www.semanticscholar.org/paper/Building-Integrated-Photovoltaic-%28BIPV%29-in-An-Study-Rahman-Haur/f35cf37390f8de78cf37e8a5ac2530f3bccf491e>
- [44] Chel, A., Tiwari, G. N., & Chandra, A. (2009). Simplified method of sizing and life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic system. *Energy and Buildings*, 41(11), 1172-1180. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.004>
- [45] Heydari, E., Mehdinezhad, J., & Doulabi, P. (2022). Strategic Principles of Designing the form of a Residential Building in Bushehr Based on Reducing Energy Consumption. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(4), 345-361. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.306864.1761>
- [46] Vassiliades, C., Agathokleous, R., Barone, G., Forzano, C., Giuzio, G. F., Palombo, A., Buonomano, A., & Kalogirou, S. (2022). Building integration of active solar energy systems: A review of geometrical and architectural characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 164, 112482. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112482>
- [47] Renewable energy world content team. (2010, December 13). *REC launches BIPV product combining REC Peak Energy modules with Solrif install kit*. <https://www.renewableenergyworld.com/solar/rec-launches-bipv/#gref>