مقاله پژوهشی

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و پنجم، شماره هفت، مهرماه ۱۴۰۲(۸۴-۶۹)

ارائه‌ی طرح برای ساختمان‌های دارای پنل خورشیدی با کسب زوایای بهینه‌ی ماه‌های مختلف سال جهت افزایش میزان تولید برق

پریا شفیع‌پوریوردشاهی[1*]

pshafipour@tvu.ac.ir

حسین سلیمانی[2]

مهدی سلیمانی‌قره‌گل[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۹

چکیده

زمینه و هدف: امروزه طراحی، معماری و زیباسازی شهری توسط پنل‌های خورشیدی برای جذب انرژی پاک که منجر به کاهش گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های زیست‌محیطی می شود، مورد توجه معماران و مهندسان قرار گرفته است. در این مقاله با توجه به اهمیت موضوع، طرحی برای بدست آوردن بهینه‌ترین زاویه پنل‌ها برای کسب بیشترین بازدهی ارائه می گردد تا با بررسی زوایای مختلف قرارگیری پنل‌ها به سمت خورشید در اجزای مختلف ساختمان، بیشترین بازدهی ممکن به دست بیاید.

روش بررسی: پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی و دارای رویکرد کمی است. در این مقاله، یک نیروگاه ۲ کیلووات جدا از شبکه توزیع برق، واقع در منطقه‌ی آلمان‌آباد شهر ارومیه انتخاب گردیده که با وارد کردن مشخصات آن در نرم‌افزار PVsyst و انجام شبیه‌سازی، اطلاعات مربوط به انرژی تولیدی برای تمامی ماه‌ها با زوایای مختلف قرارگیری پنل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. سپس مقایسه‌ای بین میزان بازدهی به‌دست آمده از نرم‌افزار و سیستم اجراشده با در نظر گرفتن زوایای بهینه انجام و راهکار طراحی معماری ارائه می‌گردد.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که نصب پنل‌های خورشیدی در قسمت‌های مختلف بنا با زوایای بهینه، بیشترین بازدهی را در تمامی ماه‌ها ایجاد می‌کند. مقایسه‌ی میزان بازدهی محاسبه شده در زوایای بهینه‌ی استخراج شده از نرم‌افزار و میزان بازدهی عملی در نیروگاه توزیع برق نمونه نشان می‌دهد که انرژی تولیدی در هر دو حالت اختلاف ناچیزی با هم دارند که نشان از تصدیق شبیه سازی‌ها دارد.

۱- عضو هیئت علمی، گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.* (مسوول مکاتبات)

۲- استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی حرفه ای، تهران، ایران

۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

بحث و نتیجه‌گیری: در صورتی‌که پنل‌های خورشیدی در بهینه‌ترین زاویه‌ی ممکن در هر ماه تنظیم شوند، در طول یک سال ۵/۸ درصد بازدهی بیشتری نسبت به حالت ثابت خواهند داشت. لذا در این پژوهش، طرح‌های مختلفی برای طراحی و زیباسازی شهری توسط پنل‌های خورشیدی پیشنهاد می‌گردد که علاوه بر حفظ بازدهی، طراحی مناسبی از لحاظ معماری ایرانی داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: پنل‌های خورشیدی، ساختمان، زاویه‌ی بهینه، بازدهی، معماری.

J. Env. Sci. Tech., Vol 25, No. 7, October, 2023

Presenting a plan for buildings with solar panels by obtaining optimal angles for different months of the year to increase the amount of electricity production

Parya Shafipour Yourdshahi [1*]

pshafipour@tvu.ac.ir

Hossein Soleimani [2]

Mehdi Soleymani Gharagol[3]

Admission Date: May 31, 2023 Date Received: February 12,2023

Abstract

Background and Objective: Nowadays, the design, architecture and urban beautification by solar panels to absorb clean energy that leads to the reduction of greenhouse gases and environmental pollution have attracted the attention of architects and engineers. In this article, due to the importance of the subject, a model is presented to obtain the most optimal angle of the panels to obtain the highest efficiency, so that the highest possible efficiency can be obtained by examining the different angles of placing the panels towards the sun in different components of the building.

Material and Methodology: The current research is applied in terms of purpose and has a quantitative approach. In this article, a 2 kW power plant, separated from the electricity distribution network, located in Almanabad area of Urmia city, has been selected, and by entering its specifications in the PVsyst software and performing simulation, the information related to the produced energy for all months has been examined.

Findings: The results show that The results showed that installing solar panels in different parts of the building with optimal angles creates the highest efficiency in all months. The comparison of the efficiency calculated in the optimal angles extracted from the software and the practical efficiency in the sample power distribution plant shows that the energy produced in both cases has a slight difference, which shows the confirmation of the simulations.

Discussion and Conclusion: If the solar panels are set at the most optimal possible angle every month, they will have 5.8% more efficiency than the fixed state during a year. Therefore, in this research, various plans for urban design and beautification by solar panels are suggested, which in addition to maintaining efficiency, have a suitable design in terms of Iranian architecture.

Keywords: Solar panels, building, optimal angle, efficiency, architecture.

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

2- Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

3- Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

مقدمه

انرژی مصرفی در ساختمان‌ها یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه ای می باشند که منجر به تغییرات آب و هوایی می‌شوند(۱). در سالهای اخیر، آگاهی عمومی از اثرات مصرف انرژی در ساختمان‌ها و تاثیر آنها در افزایش گازهای گلخانه ای افزایش یافته است(۲). چرا که درصد بالایی از آنها، توسط انرژی مصرفی از سوخت های فسیلی در ساختمان می‌باشند(۳). بنابراین، استفاده از سیستم‌های انرژی خورشیدی فعال در فرآیند طراحی و معماری ساختمان، به ابزاری مناسب جهت بهبود عملکرد انرژی آنها تبدیل شده است.

انرژی در یافتی از خورشید، یک عامل کلیدی در معماری ساختمان با استفاده از پنل‌های خورشیدی می‌باشد(۴) که توسط پنل های خورشیدی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود(۸). سیستم‌های فتوولتاییک (PV[1]) در خط مقدم یکی از کم‌هزینه‌ترین روش‌های تولید برق از انرژی خورشیدی قرار دارند(۵). استفاده از PV ها به طور مستقیم از سال ۲۰۰۹ توسط اولین دستورالعمل انرژی‌های تجدیدپذیر اتحادیه‌ی اروپا ترویج شده است(۶) که ساختمان‌ها را از یک مصرف‌کننده‌ی انرژی به یک تولیدکننده‌ی انرژی تبدیل(۷) و برق ساختمان‌ها را بدون افزایش گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های زیست‌محیطی تامین می‌کند.

در این بخش، تحقیقات انجام شدهٔ مرتبط با موضوع، بررسی و نتایج و دستاوردهای این تحقیقات به‌طور خلاصه بیان می‌گردد. با توجه به اهمیت موضوع، پژوهش‌های بسیاری در جهان در خصوص سیستم‌های خورشیدی انجام شده است که در ادامه به تعدادی از مطالعات اخیر اشاره می‌شود.

کومار[2] و همکاران به مقایسه‌ی عملکرد سیستم‌های BAPV[3] و BIPV[4] با فناوری‌های فتوولتائیک c-Si، CIS و CdTe پرداختند که 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 قرار دادند و انرژی به‌دست آمده از هر کدام را در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار دادند(۱۰).

لاکشیکا[5] همکاران، در مقاله تحت عنوان "سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی قابل تنظیم مجدد" در سال ۲۰۲۰ بیان کرده‌اند که تولید PV در پرداختن به نیازهای برق‌رسانی از طریق سیستم‌های PV مستقل (SPVS[6]) برجسته‌تر شده است. این پژوهش دو نوع اصلی SPVS را به عنوان SPVS مستقل و SPVS متصل به شبکه شناسایی کرد. در این مطالعه، SPVS های متصل به شبکه مورد توجه هستند. بسته به عملکرد و معماری سیستم، SPVS های متصل به شبکه را می توان به عنوان SPVSهای پشت‌بام و مزارع خورشیدی طبقه‌بندی کرد(۱۱).

وسیلیادگس[7] و همکاران در پژوهش خود با موضوع " ادغام ساختمان سیستم‌های انرژی خورشیدی فعال: بررسی ویژگی‌های هندسی و معماری" در سال ۲۰۲۲، یکپارچه سازی ساختمان خورشیدی را با سیستم‌های انرژی خورشیدی فعال روزمره، روی پوشش ساختمان متفاوت دانسته‌اند، زیرا سیستم فعال، جایگزین عناصر ساختمان شده و در پوشش و ساختار معماری ادغام می شود. این پژوهش راه‌حل‌های دو و تک‌نما را به‌عنوان عنصر معماری معرفی می‌کند. نتیجه نشان می‌دهد که اکثر محققان راه‌حل‌های تک‌نما را ترجیح می‌دهند و سیستم‌های دونما بعد از آن قرار می‌گیرند. زیرا در سیستم‌های دونما حفره‌ای وجود دارد که می‌تواند به عنوان مجرای هوا استفاده شود(۱۲).

الیاس‌وبر[8] و همکاران در مقاله‌ی " اسکلت بیرونی خورشیدی- یک سیستم ساختمانی یکپارچه ترکیبی از کنترل بهره خورشیدی با کارایی ساختاری" در سال ۲۰۲۲، تاکید کرده‌اند که معماران و مهندسان با چالش ارائه‌ی ساختمان‌های کم‌کربن

1- Photovoltaics
2- Kumar
3- Building Applied Photovoltaics
4- Building Integrated Photovoltaics
5- Lakshika
6- Solar Photovoltaics System
7- Vassiliadges
8- Elias Weber

روبه‌رو هستند. درحالی‌که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اغلب به طور مستقل در نظر گرفته می‌شود، اما یک سیستم ساختمانی جدید، می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی را ارائه دهد. در این پژوهش، اسکلت بیرونی خورشیدی به عنوان مسیری پایدار برای سازه‌های آینده پیشنهاد می‌شود. ارزیابی شدت مصرف کربن و انرژی ساختمان‌های چوبی و فولادی، نشان می‌دهد که ا سکلت بیرونی خور شیدی منجر به کاهش کربن به میزان ۳۷ تا ۸۰ درصد شده و ۲۴ تا ۴۸ درصد نسبت به ساختمان‌های معمولی در برابر بار جانبی مقاوم هستند(۱۳).

بنی‌رازی‌مطلق و همکاران در پژوهشی تحت عنوان "مدل ارزش یکپارچه برای ارزیابی پایداری سیستم‌های انرژی خورشیدی مسکونی برای به حداقل رساندن آلودگی هوای شهری تهران" در سال ۲۰۲۲، به این نتیجه رسیده‌اند که یک متر مربع PV و PV/T امکان جلوگیری از انتشار سالانه ۲۱۱ و ۴۸۸ کیلوگرم CO2 و همچنین ۱,۲ و ۱,۹ گرم آلاینده های PM را فراهم می‌کند. اگرچه PV به شاخص‌های پایداری بالاتری به عنوان یک جایگزین اجتماعی-اقتصادی بهتر دست می‌یابد، PV/T می‌تواند یک راه‌حل قوی باشد، زمانی که ذینفعان نسبت به الزامات زیست‌محیطی و پتانسیل کاهش آلودگی هوا حساس‌تر هستند(۱۴).

باتوجه به اهمیت استفاده از انرژی خورشیدی در سراسر جهان، مطالعات بسیاری در خصوص انواع سیستم‌های خورشیدی و کاربرد آن‌ها شده است. یکی از مسائلی که در سیستم‌های خورشیدی مطرح است، تابش خورشیدی غیرهمگن در طول سال می‌باشد که باعث می‌شود پانل‌های فتوولتائیک تابش مختلفی از خورشید را دریافت کنند که باعث کاهش کارآیی سیستم تولید PV می شود(۹). بنابراین نحوه‌ی قرارگیری و تغییرمیزان بازدهی پنل‌ها در طول ماه‌های مختلف، تاثیر قابل توجهی در عملکرد سیستم‌های خورشیدی دارد که به این مسئله توجه زیادی در پژوهش‌های انجام گرفته توسط محققان نشده است. لذا هدف از پژوهش حاضر این است که با بررسی زوایای مختلف قرارگیری پنل‌ها به سمت خورشید، زاویه‌ی مناسب برای سقف‌ها و نماهای بناهای مختلف جهت دستیابی به بیشترین انرژی ممکن به دست آید. در این راستا، یک نیروگاه ۲ کیلووات جدا از شبکه واقع در منطقه‌ی آلمان‌آباد شهر ارومیه مورد بررسی قرار گرفته و با وارد کردن اطلاعات سیستم در نرم‌افزار PVsyst و انجام شبیه‌سازی، اطلاعات مربوط به انرژی تولیدی برای ماه‌های مختلف سال به‌دست می آید. سپس زوایای بهینه‌ی استخراج شده از نرم‌افزار، در نیروگاه ۲کیلووات، اجرا و بازدهی آن‌ها برای ماه‌های مختلف سال اندازه‌گیری می شوند. در نهایت راهکاری برای طرح معماری بناها با در نظر گرفتن زوایای بهینه‌ی ماه جهت تولید برق بیشتر ارائه شده است.

مبانی نظری

نوآوری‌های اخیر در فناوری‌های هوشمند، بخصوص استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های نوین برای تولید انرژی الکتریکی، مصرف‌کنندگان را قادر می‌سازد تا انرژی الکتریکی تولید و اضافه‌ی آن را به فروش برسانند (۷) که اساس این کار فناوری‌های سیستم‌های فتوولتائیک می‌باشد. این سیستم‌ها براساس تکنولوژی ساخت و نحوه‌ی نصب در ساختمان به دو دسته‌ی جدا از ساختمان (BAPV) و بخشی از ساختمان (BIPV) تقسیم‌بندی می‌شوند. هر دو تکنیک برای گنجاندن PV در ساختمان استفاده می شوند (۱۹) که هر کدام از آنها با توجه به الویت‌های مصرف‌کننده در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند(۱۵و۱۶). مدول‌های PV در سیستم BAPV می‌توانند آزادانه‌تر در پوسته‌ی ساختمان و مصالح استفاده شوند؛ درحالی‌که سیستم BIPV می‌تواند حتی زمانی که در موقعیت ایده‌آلی قرار ندارد و تا حدی سایه‌دار باشد، عملکرد بهتری داشته باشد؛ چرا که طراحی چنین سیستمی از تصمیمات معماری حمایت می‌کند(۱۷) و گنجاندن فناوری‌های فتوولتائیک در عوض مصالح سازه‌ای معمولی، از نظر زیبایی‌شناسی، قابلیت‌های بیشتری را به یک ساختمان اضافه می‌کنند(۱۸) و ساختمان‌های نسل آینده با اعمال سیستم فتوولتائیک در پیکربندی، نما یا سقف به نیروگاه تبدیل خواهند شد(۲۰).

باتوجه به تفاوت در شکل و ساختار BAPV و BIPV، استفاده از BIPV نسبت به BAPV مزایای نسبی دارد. با در نظر گرفتن مطالب ارائه شده، بازدهی BIPV بین ۱ تا ۴ درصد کمتر از

BAPV است(۲۱). همچنین مدلی از پنل‌های خورشیدی BAPV به نام مدول خورشیدی شینگلد[1] ارائه شده که بازدهی آن حدود ۱۷ درصد بیشتر می‌باشد(۲۲). بنابراین در استفاده از هر کدام از سیستم‌ها، طراح ساختمان با توجه به الویت‌های خود باید تعادلی بین زیبایی و بازدهی ایجاد کرده و آن ویژگی را که اهمیت بیشتری از نظر طراح دارد، مورد توجه قرار دهد. جدول زیر انواع سیستم‌های خورشیدی را نشان می‌دهد.

جدول۱- انواع سیستم‌های خورشیدی(نگارندگان)

Table 1. Types of solar systems(Authors)

انواع پنل	مدل پنل	ابعاد(mm)	توان(وات)
	پنل خورشیدی جدا از ساختمان به مدل BSM355P-72	۴۰*۹۹۲*۱۹۵۶	۳۳۵
	پنل خورشیدی شینگلد جدا از ساختمان به مدل BSM415PM5-60SB	۳۵*۱۱۶۰*۱۶۹۰	۴۱۵
	پنل خورشیدی بخشی از ساختمان (سفال خورشیدی) به مدل BSM-30S	۳۵*۵۰۰*۷۰۰	۳۰

در استفاده از سیستم‌های خورشیدی، نگرانی در رابطه با چشم‌انداز ساختمان افزایش یافته است. زیبایی شناسی نقش مهمی در پذیرش سیستم‌های خورشیدی دارد؛ زیرا یکی از اجزای اساسی است که همیشه بدان توجه می‌شود. عناصر اساسی طراحی مانند رنگ، شکل و بافت و اصول طراحی مانند تنوع، تعادل، ریتم، کنتراست و تناسب نیز به عنوان ابزارهای مفید در استفاده از سیستم‌های خورشیدی توسط صاحبان خانه و معماران مورد بحث قرار گرفته است(۲۳). شکل انعطاف‌پذیر در سیستم‌های خورشیدی، به زیبایی محیط اطراف می‌افزاید که در عین حال لازم است کارآمد باشد(۲۴). از آن‌جایی که زیبایی‌شناسی نقش اساسی را در تصمیم خرید مصرف‌کننده ایفا می‌کند، در پژوهش حاضر، ارائه‌ی طرح معماری در عین رعایت اصول زیبایی‌شناسی و بازدهی بیشتری ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین این مقاله بر نیاز به تعادل زیبایی و بازدهی در سیستم‌های خورشیدی ساختمان‌های ایران تاکید می کند.

روش پژوهش

در این مقاله یک نیروگاه ۲ کیلووات جدا از شبکه توزیع برق، واقع در منطقه‌ی آلمان‌آباد شهر ارومیه مورد بررسی قرار گرفته شده است. با وارد کردن اطلاعات سیستم آن، در نرم‌افزار PVsyst و انجام شبیه‌سازی، انرژی تولیدی برای تمامی ماه‌ها با زوایای قرارگیری پنل‌ها از صفر تا ۹۰ درجه به‌دست آمد و برای هر ماه زاویه‌ای منحصربه‌فرد که در آن بیشترین بازدهی حاصل می‌شود، مشخص گردیده است. سپس زوایای بهینه‌ی استخراج شده از نرم‌افزار در نیروگاه ۲کیلووات، اجرا و بازدهی آن‌ها برای ماه‌های مختلف سال اندازه‌گیری شدند تا میزان بازدهی به‌دست آمده از نرم‌افزار با میزان بازدهی در سیستم اجراشده مقایسه شود.

1- Shingled solar module

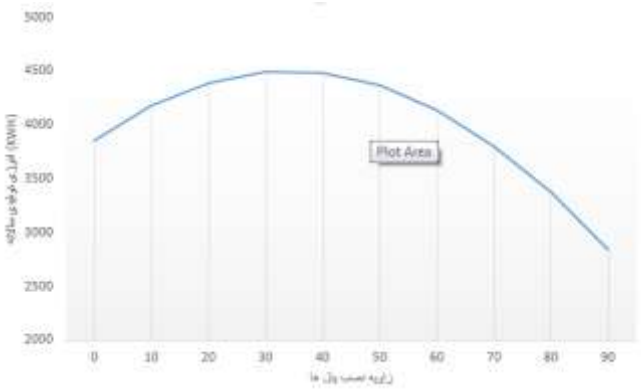
در نهایت راهکاری برای طرح معماری بناها با در نظر گرفتن زوایای بهینه‌ی مختلف جهت تولید برق بیشتر ارائه شده است.

یافته‌ها

در این بخش، تحلیل‌ها به صورت جامع و عمیق صورت گرفته و یافته‌های پژوهش ارائه می‌شود.

شبیه‌سازی و استخراج زاویه‌ی بهینه برای ماه‌های مختلف سال در شهر ارومیه

در این پژوهش یک نیروگاه ۲ کیلووات جدا از شبکه واقع در شهر ارومیه مورد بررسی قرار داده شده است و با وارد کردن اطلاعات سیستم در نرم‌افزار PVsyst و انجام شبیه‌سازی، اطلاعات مربوط به انرژی تولیدی به دست آمده است. نرم‌افزار pvsyst کاربرد گسترده‌ای دارد که به طور مستمر در دانشگاه ژنوسوئیس آن را توسعه می‌دهند. از این نرم‌افزار برای طراحی و شبیه‌سازی نیروگاه‌های خورشیدی استفاده می‌گردد(۲۵). جهت انجام شبیه-سازی زوایای مختلف از صفر تا ۹۰ درجه با نرم‌افزار، شبیه‌سازی و میزان انرژی تولیدی سالانه را به‌دست آمده است. شکل ۱ میزان انرژی تولیدی سالانه را نسبت به زاویه‌ی نصب پنل‌ها نشان می‌دهد.



شکل۱- انرژی تولیدی سالانه(نگارندگان)

Figure 1. Annual production energy(Authors)

با افزایش زاویه‌ی پنل‌ها از صفر درجه تا ۳۰ درجه، انرژی تولیدی سالانه افزایش و سپس با افزایش زاویه‌ی پنل‌ها، انرژی تولیدی کاهش یافته است. بنابراین محدوده‌ی ۳۰ تا ۴۰ درجه زاویه‌ی بهینه است. همان‌طور که قبلا گفته شد، با تغییر زاویه‌ی تابش، میزان بازدهی تغییر می‌یابد. بنابراین، قرارگیری زاویه‌ی پنل‌ها در حالت یکسان با کاهش تولید انرژی در برخی ماه‌ها همراه است. برای بررسی دقیق‌تر، شبیه‌سازی با زاویه ۳۵ درجه انجام شد و انرژی تولیدی سالانه، ۴۵۰۰ کیلووات ساعت به‌دست آمد که نسبت به زوایای ۳۰ و ۴۰ درجه، انرژی بیشتری را می‌دهد. بنابراین تحت زاویه ۳۵ درجه بیشترین بازدهی در پنل‌های خورشیدی حاصل می‌شود. این در صورتی است که زاویه‌ی پنل‌ها در ساختمان‌ها ثابت فرض شود و فقط یک زاویه برای پنل‌ها لحاظ شود. جدول۲ میزان انرژی تولیدی سالانه را در تمامی زوایای نصب پنل‌ها نشان می‌دهد.

جدول۲- میزان انرژی تولیدی سالانه(نگارندگان)

Table 2. Amount of energy produced annually(Authors)

زاویه‌ی نصب پنل‌ها	انرژی تولیدی سالانه
۰	۳۸۵۶
۱۰	۴۱۷۵
۲۰	۴۳۸۹
۳۰	۴۴۹۰
۴۰	۴۴۸۴
۵۰	۴۳۶۴
۶۰	۴۱۳۵
۷۰	۳۸۰۰
۸۰	۳۳۶۹
۹۰	۲۸۴۲

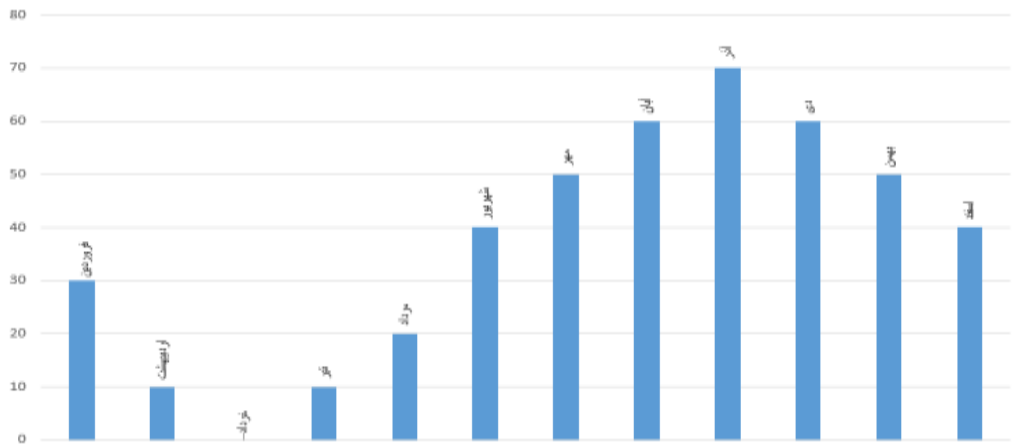
برای بررسی بیشتر در جهت ارائه‌ی زاویه‌ی بهینه، اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی برای ماه‌های مختلف سال به صورت جداگانه در زوایای صفر تا ۹۰ درجه بررسی شده است. جدول ۳ اطلاعات انرژی تولیدی را در ماه‌های مختلف سال در زوایای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۳- اطلاعات انرژی تولیدی را در ماه‌های مختلف سال(نگارندگان)

Table 3. Information on energy production in different months of the year(Authors)

زاویه (درجه) / ماه	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
فروردین	۳۶۸/۲	۳۸۷/۲	۳۹۶/۷	۳۹۷	۳۸۸/۳	۳۷۰/۴	۳۴۳/۱	۳۰۷	۲۶۲/۴	۲۰۹/۷
اردیبهشت	۴۴۹/۱	۴۵۳/۲	۴۴۷/۲	۴۳۱/۵	۴۰۷	۳۷۲/۹	۳۲۹/۲	۲۷۶/۹	۲۱۷/۵	۱۵۴/۳
خرداد	۴۷۹/۵	۴۷۶/۷	۴۶۳/۱	۴۳۹/۴	۴۰۸	۳۶۶	۳۱۴/۶	۲۵۴	۱۹۱/۱	۱۲۱/۳
تیر	۴۸۶/۴	۴۸۷	۴۷۶/۶	۴۵۵/۶	۴۲۵/۹	۳۸۵/۷	۳۳۵/۳	۲۷۵/۶	۲۱۰/۱	۱۳۸/۹
مرداد	۴۳۶/۸	۴۵۲/۱	۴۵۶/۶	۴۵۰/۶	۴۳۴/۵	۴۰۷/۸	۳۷۰/۲	۳۲۲/۴	۲۶۴/۷	۱۹۹/۴
شهریور	۳۶۰/۳	۳۹۳	۴۱۵/۲	۴۲۶/۹	۴۲۸/۱	۴۱۹	۳۹۹/۲	۳۶۹	۳۲۷/۸	۲۷۵/۶
مهر	۲۶۱/۵	۳۰۲	۳۳۳/۹	۳۵۶/۷	۳۷۰/۳	۳۷۴/۷	۳۷۰/۱	۳۵۶/۳	۳۳۳/۲	۳۰۰/۴
آبان	۱۷۹/۳	۲۲۴/۶	۲۶۲/۱	۲۹۱/۸	۳۱۳	۳۲۵/۵	۳۳۰/۱	۳۲۷/۲	۳۱۶	۲۹۶/۲
آذر	۱۴۸	۱۹۴/۳	۲۳۳/۱	۲۶۴/۷	۲۸۸/۳	۳۰۳/۸	۳۱۱/۴	۳۱۱/۵	۳۰۴/۲	۲۸۸/۵
دی	۱۶۹/۲	۲۱۵/۷	۲۵۴/۷	۲۸۵/۷	۳۰۸/۳	۳۲۱/۸	۳۲۷/۵	۳۲۶	۳۱۶/۷	۲۹۸/۱
بهمن	۲۱۶/۸	۲۵۸/۹	۲۹۳/۳	۳۱۹/۲	۳۳۶/۱	۳۴۴/۱	۳۴۳/۱	۳۳۶/۱	۳۱۸/۸	۲۹۲/۵
اسفند	۳۰۱/۴	۳۳۳/۵	۳۵۷/۲	۳۷۱/۵	۳۷۶/۶	۳۷۲/۹	۳۶۰/۱	۳۳۸/۲	۳۰۷/۴	۲۶۷/۴

همان‌طور که در جدول مشخص است در ماه فروردین زاویه بهینه ۳۰ درجه و در ماه اردیبهشت ۱۰ درجه است و به همین ترتیب در ماه‌های مختلف زاویه‌ی بهینه متفاوت است. شکل ۲ نمودار زاویه بهینه را با تغییر در ماه‌ها نشان می دهد.



شکل ۲- نمودار زاویه‌ی بهینه در هرماه(نگارندگان)

Figure 2. Optimum angle diagram in each month(Authors)

شکل ۲ نشان می‌دهد که کمترین زاویه مربوط به خرداد و بیشترین زاویه مربوط به آذر است. در واقع هر چه روزها بلندتر می‌شود زاویه‌ی بهینه به سمت صفر و با کوتاه‌تر شدن روزها زاویه‌ی بهینه به سمت ۷۰ درجه میل می‌کند. اگر زاویه‌ی پنل‌ها، هر ماه در بهینه‌ترین حالت ممکن قرار گیرد، در این‌صورت میزان انرژی به دست آمده در طی یکسال برای نیروگاه مورد مطالعه، ۴۷۶۵ کیلوات‌ساعت در سال خواهد بود. بنابراین، این حالت، نسبت به حالتی که زاویه در طی یکسال ثابت و روی ۳۵ تنظیم می‌شود، این انرژی ۵/۸ درصد بیشتر است.

جهت بررسی نتایج به‌دست آمده از طریق نرم افزار، در سیستم خورشیدی ۲ کیلووات اجرا شده در شهر ارومیه، هر ماه زاویه‌ی پنل‌ها را بر روی زاویه‌ی بهینه تنظیم و انرژی تولیدی اندازه گرفته شده است. این کار برای دوازده ماه سال انجام گرفت و انرژی تولیدی هر ماه با زاویه‌ی بهینه اندازه گیری شد. جدول ۴ نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد.

جدول۴- مقایسه‌ی انرژی تولیدی محاسبه شده توسط نرم‌افزار و اندازه‌گیری شده در سیستم اجرا شده برای زاویه‌ی بهینه ماه‌های مختلف(نگارندگان)

Table 4. Comparison of the energy production calculated by the software and measured in the implemented system for the optimal angle of different months(Authors)

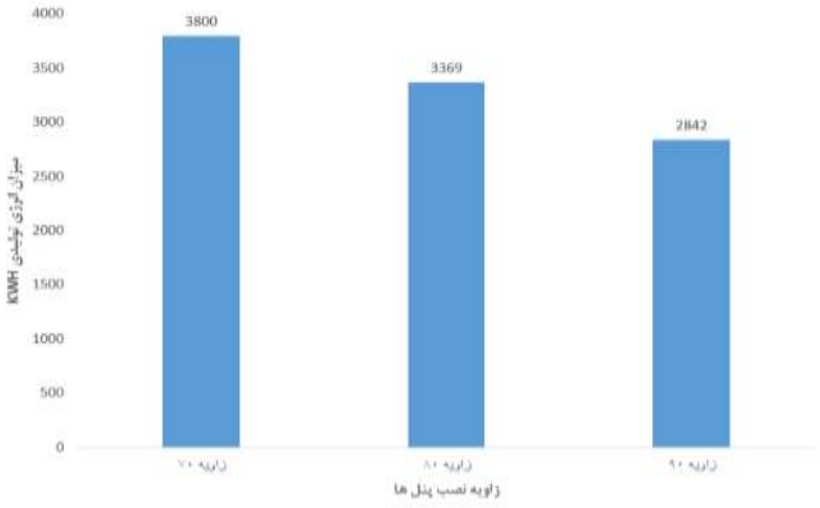
ماه	زاویه نصب بهینه	انرژی تولیدی اندازه‌گیری شده در سیستم اجرا شده	انرژی تولیدی محاسبه شده توسط نرم افزار PVsyst
فروردین	۳۰	۴۰۵	۳۹۷
اردیبهشت	۱۰	۴۶۱	۴۵۳/۲
خرداد	۰	۴۷۰	۴۷۹/۵
تیر	۱۰	۴۸۰	۴۸۷
مرداد	۲۰	۴۶۲	۴۵۶/۶
شهریور	۴۰	۴۳۵	۴۲۸/۱
مهر	۵۰	۳۶۶	۳۷۴/۷
آبان	۶۰	۳۳۶	۳۳۰/۱
آذر	۷۰	۳۱۸	۳۱۱/۵
دی	۶۰	۳۳۳	۳۲۷/۵
بهمن	۵۰	۳۴۹	۳۴۴/۱
اسفند	۴۰	۳۷۰	۳۷۶/۶

شکل۳ مقایسه‌ی نتایج حاصل از انرژی تولیدی اندازه‌گیری شده در سیستم اجرا شده و انرژی تولیدی محاسبه شده توسط نرم افزار PVsyst را به صورت نمودار نشان می‌دهد.

شکل۳- مقایسه‌ی نتایج حاصل از انرژی تولیدی اندازه‌گیری شده در سیستم اجرا شده و انرژی تولیدی محاسبه شده توسط نرم افزار PVsyst(نگارندگان)

Figure 3. Comparison of the results of the production energy measured in the implemented system and the production energy calculated by the PVsyst software(Authors).

جدول ۴ بیان می‌کند که در هیچ‌کدام از ماه‌های سال، زاویه‌ی بهینه از ۷۰ درجه بیشتر نشده است و بنابراین در هیچ ماهی از سال نمی‌توان زاویه را بیشتر از ۷۰ درجه در نظر گرفت. از طرفی اکثر نماهای ساختمان‌ها در سطح شهر به صورت عمودی طراحی می‌شوند. در صورتی که بتوان شیب ۷۰ درجه‌ای را در طراحی نمای ساختمان‌ها و یا بخشی از آن‌ها جهت نصب پنل‌های خورشیدی در نظر گرفت، میزان انرژی تولیدی افزایش می‌یابد. شکل۴ مقایسه‌ی زوایای مختلف نصب پنل‌ها در نمای ساختمان را نشان می‌دهد.



شکل۴- مقایسه‌ی زوایای مختلف نصب پنل‌ها در نمای ساختمان(نگارندگان)

Figure 4. Comparison of different angles of installing panels in the facade of the building(Authors)

بررسی‌ها نشان می‌دهند که میزان بازدهی در نمای طراحی شده با شیب ۷۰ درجه نسبت به شیب ۹۰ درجه، ۲۵ درصد بیشتر است. بنابراین با انتخاب زاویه‌ی ۷۰ هم بازدهی سالانه بیشتر می شود و هم همان‌طور که در جدول ۴ م شخص شد، در ماه

آذر بیشـــترین انرژی ممکن را می‌توان از خورشـید دریافت کرد. بنابراین، این راهکار در طراحی نما می‌تواند مورد توجه معماران قرار گیرد.

طرح معماری با در نظر گرفتن زاویه‌های بهینه‌ی پنل‌های خورشیدی

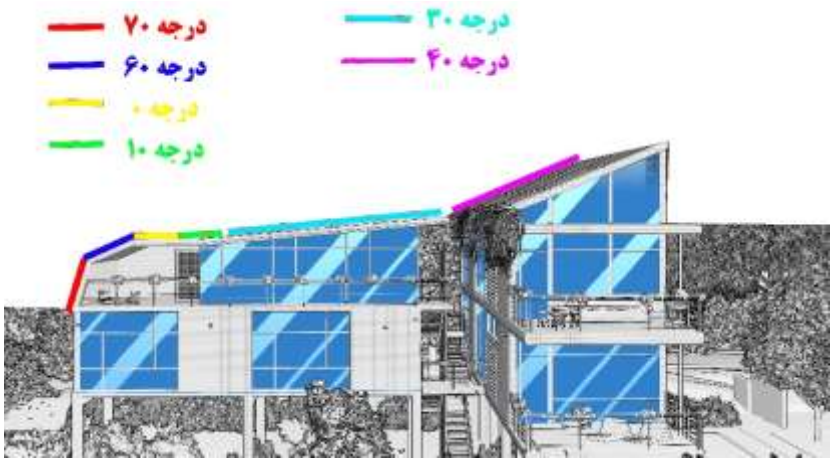
همان‌طور که در پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار PVsyst و مقایســـه‌ی آن با نمونه‌ی اجرا شـــده در منطقه‌ی آلمان‌آباد ارومیه به دست آمد؛ پنل‌های خورشیدی با قرار گرفتن در زاویه‌ی بهینه در هر ماه می‌توانند بیشـترین بازدهی را از نظر تولید انرژی خورشـیدی جهت تولید برق ایجاد کنند. در کشـور ایران، تمامی طراحی بناها منحصـرا به سـاختمان‌هایی با سـقف افقی و یا شیبدار با یک زاویه‌ی خاص و نماهای عمودی محدود شده‌اند که با نصب پنل‌های خور شیدی با زاویه‌ی ناهماهنگ با ســطوح ســاختمان‌ها، منظر بنا و به دنبال آن جلوه‌ی شــهر با آشـــفتگی هایی رو به‌رو می‌شـــود. لذا این بخش از پژوهش، طرح‌هایی را با درنظرگرفتن زوایای بهینه برای نصـــب پنل‌های خورشیدی ارائه می‌دهد که بتوان علی‌رغم رعایت اصول معماری و زیبایی شنا سی که شامل عنا صر ا سا سی طراحی مانند رنگ، شکل و بافت و اصول طراحی چون تنوع، تعادل، ریتم، کنتراست و تنا سب ه ستند، بی شترین بازدهی را نیز در تولید برق دا شته باشند. راهکارهای ارائه‌شده به ترتیب زیر می‌باشند که شکل‌های ۵ تا ۸ انواع طراحی‌ها را در این خصوص نشان می‌دهند.

الف- می‌توان ســـقف های بناها را طوری طراحی نمود که زوایای صـــفر تا ۷۰ درجه برای نصـــب پنل‌های خورشـــیدی را دربرگیرد.

ب- نمای ساختمان‌ها مخصوصا در کاربری‌هایی چون تجاری، اداری و ... می‌تواند تا ۷۰ درجه کاهش یابد.

شکل۵- نمونه‌ی اجراشده‌ی پنل‌ها با زوایای مختلف در یک ویلای مسکونی(نگارندگان)

Figure 5. An example of panels with different angles in a residential villa(Authors)



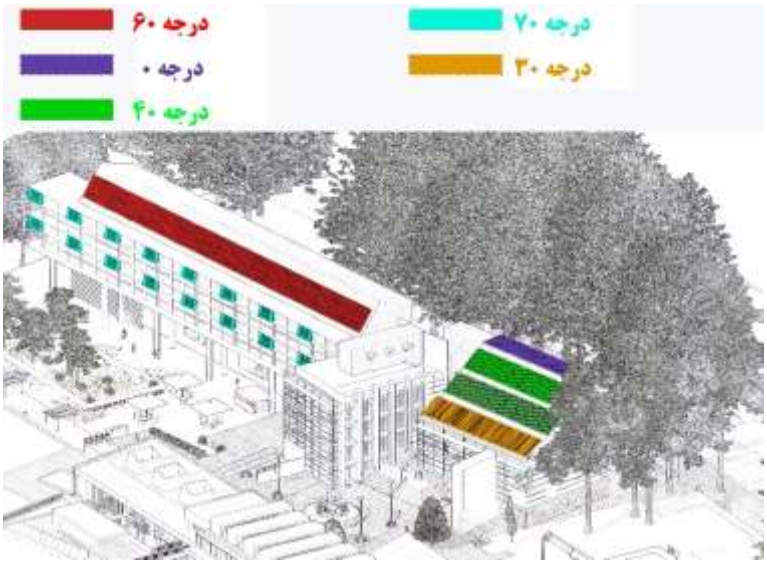
شکل۶- زوایای نصب پنل‌ها در یک ویلای مسکونی(نگارندگان)

Figure 6. Panel installation angles in a residential villa(Authors)

همانطور که در تحلیل شکل ۶ مشخص است، ویلای مسکونی طوری طراحی شده است که پنل‌ها با در نظر گرفتن زوایای بهینه‌ی به دست آمده از جدول ۴، در سقف و انتهای نمای آن نصب شده‌اند تا علاوه‌بر حفظ زیبایی، میزان انرژی تولیدی در تمامی ماه‌ها به حداکثر برسد.

شکل۷- نمونه‌ی اجراشده‌ی پنل‌ها با زوایای مختلف در یک مجتمع تجاری(نگارندگان)

Figure 7. An example of panels with different angles in a commercial complex(Authors)



شکل۸- زوایای نصب پنل‌ها در یک مجتمع تجاری(نگارندگان)

Figure 8. Panel installation angles in a commercial complex(Authors)

شکل۸ بیان می‌کند که طراحی مجتمع تجاری این امکان را فراهم می‌آورد که پنل‌ها با در نظر گرفتن زوایای بهینه‌ی به دست آمده از جدول ۴، در سقف و نمای مجتمع تجاری نصب شوند تا علاوه‌بر ایجاد هماهنگی، میزان انرژی تولیدی در اغلب ماه‌ها به حداکثر برسد. طراحی‌های انجام‌شده در نمونه‌های فوق، قابلیت نصب پنل‌ها در زوایای مختلف را فراهم آورده‌اند. این امر علاوه‌بر تولید انرژی حداکثر و اتلاف انرژی حداقل در تمامی ماه‌های سال، موارد اساسی اصول طراحی چون تنوع، تعادل، ریتم، کنتراست و تناسب را نیز در معماری ساختمان ایجاد کرده است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، زوایای بهینه جهت نصب پنل‌های خورشیدی در اجزای مختلف ساختمان‌ها در ماه‌های مختلف سال برر سی شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در صورتی‌که زاویه‌ی پنل‌ها در طول یک سال ثابت باشد، زاویه‌ی ۳۵ درجه جهت نصب پنل‌ها می‌تواند بیشترین بازدهی را دا شته با شد. از طرفی در صورتی‌که پنل‌های خور شیدی در بهینه‌ترین زاویه‌ی ممکن در هر ماه تنظیم شوند، در طول یک سال ۵/۸ درصد بازدهی بیشتری نسبت به حالت ثابت خواهند دا شت. مقایسه‌ی میزان بازدهی محا سبه شده برای زوایای بهینه‌ی م ستخرج از نرم‌افزار در نیرو گاه ۲ کیلووات در منطقه‌ی آلمان‌آ باد ارومیه و میزان بازدهی اندازه‌گیری شده با در نظر گرفتن زوایای بهینه‌ی هر ماه در سیستم اجرا شده نشان داد که انرژی تولیدی به‌دست‌آمده از سیستم اجرا شده، اختلاف ناچیزی با انرژی تولیدی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار دارد. از طرفی این پژوهش نشان داد که میزان بازدهی در نمای طراحی شده با شیب ۷۰ درجه نسبت به شیب ۹۰ درجه، ۲۵ در صد بی شتر ا ست. ازاین‌رو می‌توان در ق سمت‌های مختلف نمای ساختمان این امکان را جهت تولید انرژی بیشتر در نظر گرفت. نتایج پژوهش در این بخش به ترتیب زیر هستند:

۱. در صورتی‌که زاویه‌ی نصب پنل‌ها ثابت فرض شود و صرفا یک زاویه لحاظ گردد، زاویه‌ی بهینه ۳۵ درجه است که در این‌صورت بازدهی افزایش می‌یابد.

۲. پنل های می‌توانند در هر ماه از سال در یک زاو یه‌ی بهینه‌ی منحصربه‌فرد نصب شوند که در این‌صورت میزان بازدهی در طول یک سال ۵،۸ درصد بیشتر از حالت ثابت است.

با تو جه به بررسی های ان جام‌گرف ته، مع ماران در طراحی بخش‌های مختلف ساختمان‌ها به‌ویژه در طراحی سقف‌ها و نماها، می‌توانند امکان نصب پنل‌های خورشیدی را با زوایای بهینه‌ی هر ماه جهت تولید انرژی و بازدهی بیشتر فراهم آورند. علاوه‌برآن، زیبایی سیستم‌های خورشیدی در ساختمان‌های ایران با ید مورد تو جه قرار گیرد و طرح های مع ماری، ت مامی

عناصر اساسی طراحی مانند رنگ، شکل و بافت و اصول طراحی مانند تنوع، تعادل، ریتم، کنتراست و تناسب را در برگیرند. بنابراین لازم است بین زیبایی و بازدهی در استفاده از سیستم‌های خورشیدی در ساختمان‌های ایران تعادل برقرار شود تا مصرف‌کننده را جهت استفاده از انرژی خورشیدی تشویق کند. در این راستا، معماران لازم است طرح‌هایی را ارائه دهند که زوایای بهینه در ماه‌های مختلف در نماها و سقف بناها در عین زیبایی، لحاظ شوند. همچنین استفاده از پنل‌های متحرک و قابل تنظیم با زوایای خورشید در ماه‌های مختلف در بخش‌های مختلف بناها از جمله سایبان‌های پنجره‌ها و ورودی‌ها جهت افزایش میزان بازدهی پیشنهاد می‌گردد.

از این رو پژوهش حاضر طرح‌هایی را ارائه می‌دهد که در عین رعایت اصول معماری و زیبایی شناسی، بیشترین بازدهی را نیز در تولید برق داشته باشند. طرح‌های ارائه شده، علاوه بر تولید انرژی حداکثر و اتلاف انرژی حداقل در تمامی ماه‌های سال، موارد اساسی اصول طراحی چون تنوع، تعادل، ریتم، کنتراست و تناسب را نیز در معماری ساختمان ایجاد کرده‌اند. بنابراین استفاده از انرژی پاک در بناهای مختلف، علی رغم کاهش گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌تواند باعث زیبایی نمای شهر شود.

References

1. Kolokotsa, D., Santamouris, M. and Young Yun, G. 2022. 3.19-Passive solar architecture. *Comprehensive Renewable Energy*, Vol. 3, pp. 725-741.
2. Efthymiou, M., Kontonis, P.R., Leonidou, A., Kazanakis, G. and Vassiliades, C. 2020. Investigation of sun protection issues via the active and passive building integration of active solar energy systems: A case study of the renovation of an existing building in cyprus. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 410, 012063
3. Italos, C., Patsias, M., Yiangou, A., Stavrinou, S. and Vassiliades, C. 2022. Use of double skin façade with building integrated solar systems for an energy renovation of an existing building in Limassol, Cyprus: Energy performance analisis. *Energy Reports*, Vol.8, pp. 15144-15161.
4. Duan, Q., Feng, Y. and Wang, J. 2021. Clustering of visible and infrared solar irradiance for solar architecture design and analysis. *Renewable Energy*, Vol 165, pp. 668-677.
5. Kougias, I., Taylor, N., Kakoulaki, G. and Jäger-Waldau, A. 2021. The role of photovoltaics for the European Green Deal and the recovery plan. Renew. *Sustain. Energy Rev*, Vol. 144, 111017.
6. Jäger-Waldau, A. 2018. Snapshot of photovoltaics. *EPJ Photovolt*. Vol 9, pp. 6-21.
7. Prasad, D. and Snow, M. 2014. *Designing with Solar Power: A Source Book for Building Integrated Photovoltaics*. Routledge.
8. Huo M.L and Zhang D.W. 2012. Lessons from photovoltaic policies in China for future development. *Energy Policy*, Vol.51, pp.38–45.
9. Ngoc, T.N., Sanseverino, E.R., Quang, N.N., Romano, P., Viola, F., Van, B.D., Huy, H.N., Trong, T.T. and Phung, Q.N. 2019. A hierarchical architecture for increasing efficiency of large photovoltaic plants unde non-homogeneous solar irradiation. *Solar Energy*, Vol.188, pp.1306-1319.
10. Kumar, N. M., Sudhakar, K., and 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*, Vol.13, 100374.

11. Lakshika, K.A.H., Sandaru Boralessa, M.A.K., Perera, M.K., Wadduwange, D.P., Saravanan, V. and Udayanga Hemapala, K.T.M. 2020. Reconfigurable solar photovoltaic systems: A review, *Heliyon*, Vol. 6. pp. 581-599.
12. Vassiliadges, C., Agathokleous, R., Barone, G., Forzano, C., Giuzio, G.F., Palombo, A., Buonomano, A. and Kalogirou, S. 2022. Building integration of active solar energy systems: A review of geometrical and architectural characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.164. pp. 267-282.
13. Elias Weber, R., Mueller, C. and Reinhart, C. 2022. Solar Exoskeletons-An integrated building system combining solar gain control with structural efficiency. *Solar Energy*, Vol.240, pp.301-314.
14. Banirazi Motlagh. S.H., Amin Hosseini, S.M. and Pons-Valladares, O. 2022. Integrated value model for sustainability assessment of residential solar energy systems towards minimizing urban air pollution in Tehran. *Solar Energy*, Vol.249, pp.40-66. (In Persian)
15. Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A., Shahrestani, M., Yao, R., Shao, L., Essah, E., Oliveira, A. C., Del Cano, T., and Rico, E. 2017. A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. *Engineering science and technology*, Vol.20(3), pp. 833-858.
16. Tripathy, M., Sadhu, P., and Panda, S. 2016. A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 61, 451-465.
17. Zomer, C., Custodio, I., Antoniolli, A. and Ruther, R. 2020. Performance assessment of partially shaded building-integrated photovoltaic (BIPV) systems in a positive-energy solar energy laboratory building: Architecture perspectives. *Solar Energy*, Vol. 211, pp. 879-896.
18. Hoang Bao Huy, T., Truong Dinh, H. and Kim, D. 2023. Multi-objective framework for a home energy management system with the integration of solar energy and an electric vehicle using an augmented ε-constraint method and lexicographic optimization. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 88, pp. 569-582.
19. Gosh, A. 2020. Potential of building integrated and attached/applied photovoltaic (BIPV/BAPV) for adaptive less energy-hungry building's skin: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 276, pp. 1262-1273.
20. Kumar, N.M., Sudhakar, K., Samykano, M. and Sukumaran, S. 2018. Dust cleaning robots (DCR) for BIPV and BAPV solar power plants-A conceptual framework and research challenges, Procedia *Computer Science*, Vol. 133, pp. 746-754.
21. Nallapaneni K., Manoj, K., Sudhakar, K. and 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*, Vol 13, pp. 100374.
22. Kladen, N., Weisse, D., Robler, T., Holger Neuhaus, D. and Kraft, A. 2021.

Performance of shingled solar modules under partial shading, *Photovoltaics Wiley*, pp. 325-338.

23. AmoAwuku, S., Bennadji and Muhammad-Sukki, F. 2021. Myth or gold? The power of aesthetics in the adoption of building integrated photovoltaics (BIPVs). *Energy Nexus*, Vol. 4, 100021.
24. Gupta, D.K., Langelaar, M., Barink, M. and Keulen, F. 2016. Optimizing front metallization patterns: Efficiency with aesthetics in free-form solar cells, *Renewable Energy*. Vol 86, pp. 1332-1339.
25. Behera, D.D., Das, S.S., Mishra, S.P., Mohanty, R.C., Mohanty, A.M. and Nayak, B.B. 2022. Simulation of solar operated grass cutting machine using PVSYST software, *Materialstoday*. Vol.62, pp. 3044-3050.