

Investigating the Potential of Designing Net-Zero Energy Buildings Considering Photovoltaic Installation and Urban Planning Requirements

Research Article

Seyed Sajad Rezaeinasab¹, Abbasali Tayefi Nasrabadi², Somayeh Asadi³, Seiyed Ali Haj Seiyed Taghia⁴

DOI: [10.22067/jfeci.2023.79510.1190](https://doi.org/10.22067/jfeci.2023.79510.1190)

1. Introduction

Population growth, human activities, and immense consumption of energy resources have caused some challenges, including climate changes, lack of resources, and environmental problems. The emergence and increasing development of new technologies have made it possible to save energy and realize net-zero energy buildings (NZEBs) almost anywhere in the world. The main focus of NZEB is to first decrease energy consumption and then use renewable energy sources (RES) to meet the remaining energy consumption during the year. Among RES, photovoltaic (PV) is of the most promising and acceptable photoelectric generators in the design of NZEBs.

The implementation of PV follows the benefit of being a pro-ecological energy source and has been addressed in previous research. However, this emerging technology has some challenges and negative aspects, such as relatively expensive, high initial investment, life cycle operational cost, and productivity dependency on location and climatic conditions. The above-mentioned facts resulted in the feasibility of PV installation, which has received increasing attention among researchers worldwide. Typically, PV modules are used as building-integrated photovoltaic components (BIPV) in the building's design stage and cover part of or the total energy demand of the building. PV modules can be installed on roofs (roof-top PV panels), facades, glazing areas of windows, and even on overhangs to generate electricity.

From a geometrical point of view, there are two parameters that exert significant influence on the productivity of PV installation: tilt angle and azimuth. Generally, previous research confirm that to maximize PV generation, the optimum tilt angle is nearly equal to the latitude of the location, and the PV module should face the equator. However, PV installation should be placed where the shading effect by surrounding objects is the minimum as shading causes a significant drop in PV's efficiency.

On the other hand, considering climatic and location issues, one cannot turn a blind eye to the fact that the amount of solar irradiation is a critical factor for the feasibility of PV installation in a specific location. Since the PV system and its components cannot convert 100% of the absorbed light into electricity, some of this energy is lost in the form of heat, raises the cell's temperature, and drops the power output significantly. The detailed review of previous research indicates that there have been extensive efforts in PV installation in designing NZEBs and relevant challenges associated with it have been scrutinized. PV sizing depends not only on climatic conditions but also on architectural and urban planning regulations. For example, shading effects of surroundings that is related to crossing width, roof type (in terms of flat or pitched), pitched roof's slope, as well as window-to-wall area ratio (WWR) directly affects the thermal and lighting demand.

Considering all these issues, a systematic study was performed to evaluate the utilization of PV systems in achieving an NZEB in the northern Iran climate region. First, a sensitivity analysis was performed to indicate the most influential variables that affect building energy demand and cost. Next, an optimization process was conducted to concurrently minimize the building energy consumption and capital cost. Besides, a different configuration for PV panel installation was used for quantifying the possibility of achieving NZEB. The results show that in a residential 3-story building the optimized configuration of building envelope and systems can reduce electricity consumption by 20%. The rooftop PV account for 87.2%, and PV installation on the southern façade contributed to 12.8% of total electricity generation. PV installation on the south façade and roof covers 88.2% of the building's electricity demand.

2. Building model

A typical 3-story residential building was presumed as a case study. The length and width of the building are 12 and

*Manuscript received: November 9, 2022, Revised, January 2, 2023, Accepted, February 19, 2023.

¹. Ph.D. Candidate in Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran.

². Corresponding Author: Assistant Professor of Civil and Architectural Engineering, Fereshtegan International Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. **Email:** abbasali.tayefi@iau.ac.ir.

³. Associate Professor in Department of Architectural Engineering, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA.

⁴. Assistant Professor in Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran.

8 meters, respectively. The height of each floor is 3 meters. Another building with exactly the same dimensions is located on the opposite side with a distance of 8 meters. In the base case model, building characteristics are in accordance with minimum energy requirements based on the National Building Code of Iran - Chapter 19. A clear double-glazing with 3 mm thickness and 13 mm air space was used for windows structure. Figure 1 shows a schematic of the building.

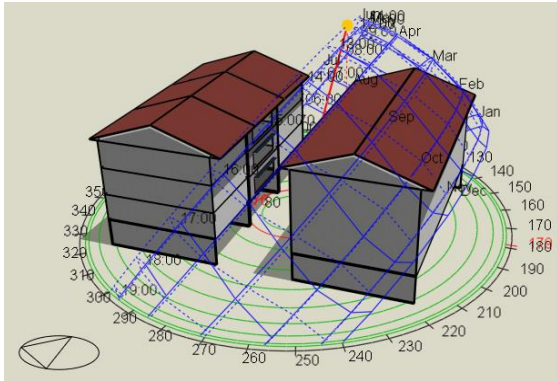


Figure 1. Schematic view of the building

3. Sensitivity analysis

In order to perform sensitivity analysis, the regression method was used. Sensitivity analysis shows that external wall construction, glazing types, and WWR, as well as an overhang on the south window, are the most influential variables that affect both building energy consumption and capital cost.

4. Optimization

Based on sensitivity analysis results, non-influential variables were removed from the optimization analysis. In this study, the objectives are capital cost and total electricity consumption. What we are trying to find is the optimum trade-off between the objectives which typically conflict. Energy consumption will decrease by high-performance and more costly solutions. The genetic algorithm intelligently selects the solutions which best match the design objectives and chooses the strongest balance of solutions to carry forward into subsequent batches or generations for analysis. In the optimization model the wall's u-value, WWR in north and south facades, south overhang, and glazing type set to 0.4, 20%, 45%, 50 cm, and double Lo-E Clear 6mm air, respectively, which had the lowest cost in the optimization trade-off.

Optimization reveals that by choosing optimum values for the configuration of building envelop and systems, the electricity consumption drops by 20%.

5. Design of PV System

Using PV installation on the south façade and roof satisfies 88.2% of the building's electricity demand. In this regard, the roof-top PV contribution is the highest (87.2%), while the PV installation on the southern façade is the least (overall 12.8 %). Table 1 shows the combination of different energy-generating parts to achieve a building with net zero energy and related electricity generation and consumption.

Table 1. The combination of different energy-generating parts to achieve a building with net zero energy

	Facade (BIPV) (kWh)	Rooftop (South) (kWh)	Rooftop (North) (kWh)	Total Generation (kWh)	Consumption (kWh)
1st Floor	718.7			17570.7	6656
2nd Floor	962	9745	7107	17814	7517
3rd Floor	808			17660	7750
sum	2489			19341	21923

6. Conclusion

Taking all the existing considerations and following all legal and technical requirements into account, this study investigated the possibility of designing an NZEB located in the southern region of the Caspian Sea. At first, different building configurations to minimize building electricity loads, including design variables such as insulation, glazing, and shading devices, were analyzed. Before optimization, a sensitivity analysis was performed to decrease the number of variables and, consequently, the optimization time. Once the building's shape and system were selected, photovoltaic panels were installed on the southern façade to generate as much electricity as possible. Finally, rooftop PV panels installed on the roof of the building would meet the remaining energy loads to achieve an NZEB. Optimization reveals that by choosing optimum values for the configuration of building envelop and systems, the electricity consumption drops by 20%. Using PV installation on the south façade and roof satisfies 88.2% of the building's electricity demand. In this regard, the roof-top PV contribution is the highest (87.2%), while the PV installation on the southern façade is the least (overall 12.8 %.) This means that the application of vertically-mounted BIPV on the façade will not be cost-effective due to shading effects and vertical tilt angle. Thus, achieving an NZE for a 3-story building is not possible to realize in the examined location but considering just one floor, covering annual demand with appropriate PV panels on the roof is feasible. The results of this study revealed the potential of realizing an NZEB regarding PV functionality, architectural configuration, and urban planning restrictions in the studied location. Iran has a rich diversity regarding climate conditions and solar irradiation. Hence, similar research can be proposed for future studies. Moreover, since the life cycle cost and economic issues associated with the utilization of PV in the construction and the operational stage are gaining importance, a more detailed and realistic simulation enables designers to attain reliable achievements.



بررسی امکان دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر با استفاده از سیستمهای فتوولتائیک و در نظر گرفتن الزامات طرحهای توسعه شهری*

مقاله پژوهشی

سیدسجاد رضائی نسب^(۱)، عباسعلی طایفی نصرآبادی^(۲)، سمیه اسدی^(۳)، سیدعلی حاج سید تقیآ^(۴)

DOI: 10.22067/jfeci.2023.79510.1190

چکیده با توجه به پیشرفت تکنولوژیکی و توسعه سیستمهای فتوولتائیک، استفاده از این فناوری برای ساختمانهای با انرژی خالص صفر امیدوارکننده است. با این حال، برای دستیابی به نتایج قابل اطمینانتر، تجزیه و تحلیل دقیق انرژی در ساختمان با در نظر گرفتن محدودیتهای شهری، شرایط آب و هوایی و منابع انرژی تجدیدپذیر ضروری است. هدف از این مطالعه تعیین پیکربندی مناسب اجزای ساختمان و تأسیسات فتوولتائیک برای دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر با در نظر گرفتن شرایط محیطی و محدودیتهای طرحهای شهری می باشد. ابتدا به کمک تحلیل حساسیت متغیرهای تأثیرگذار مؤثر بر توابع هدف (مصرف انرژی در ساختمان و هزینه) شناسایی شدند. سپس برای کمینه کردن توابع هدف از فرایند بهینه سازی استفاده شد. ترکیبات مختلفی از سیستمهای فتوولتائیک برای تأمین الکتریسیته مورد نیاز ساختمان به منظور دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل سازی در یک ساختمان مسکونی سه طبقه واقع در شهر رشت نشان می دهد بهینه سازی انرژی در ساختمان، مصرف انرژی را تا ۲۰٪ کاهش می دهد. سوله های خورشیدی نصب شده روی پشت بام ۸۷/۲٪ کل انرژی الکتریسیته تولید شده و سوله های خورشیدی نصب شده در نمای جنوبی ۱۲/۸٪ کل انرژی تولید شده سیستم فتوولتائیک را تشکیل می دهد. همچنین با نصب سوله های خورشیدی روی سقف و نمای جنوبی ساختمان می توان تا ۸۸/۲٪ انرژی مورد نیاز یک ساختمان سه طبقه را در محل مورد مطالعه تأمین کرد.

واژه های کلیدی ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر، فتوولتائیک، الزامات طرح های شهری، تحلیل حساسیت، بهینه سازی.

Investigating the Potential of Designing Net-Zero Energy Buildings using Photovoltaic Installation with Considering Urban Development Plans Requirements

Seyed Sajad Rezaeinasab Abbasali Tayefi Nasrabadi Somayeh Asadi Seiyed Ali Haj Seiyed Taghia

Abstract Due to technological improvement and development of photovoltaic (PV) systems, the application of PV installation for net-zero energy buildings (NZEBS) is promising. However, to achieve more reliable results, precise energy analysis is necessary to take into consideration both the urban plans restrictions and the climatic conditions of renewable energy resources and building energy consumption. This study aims to define the most favorable configuration of building components and PV installation to meet NZEB requirements, considering urban development plans limits. First, a sensitivity analysis was performed to indicate the most influential variables that affect building energy demand and cost. Next, an optimization process was conducted to concurrently minimize the building energy consumption and capital cost. Besides, a different configuration for PV panel installation was used for quantifying the possibility of achieving NZEB. The results show that in a residential 3-story building the optimized configuration of building envelope and systems can reduce electricity consumption by 20%. The rooftop PV account for 87.2%, and PV installation on the southern façade contributed to 12.8% of total electricity generation. PV installation on the south façade and roof covers 88.2% of the building's electricity demand.

Keywords Net-zero energy buildings, photovoltaic, urban planning requirements, sensitivity analysis, optimization

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۱/۳۰ می باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مدیریت ساخت گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

(۲) نویسنده مسئول؛ استادیار گروه مهندسی عمران و معماری، واحد بین المللی فرشتگان، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۳) دانشیار گروه مهندسی معماری، دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا، یونیورسیتی پارک، پنسیلوانیا، آمریکا.

(۴) استادیار گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

مقدمه

رشد جمعیت، فعالیتهای انسانی و مصرف بی‌رویه منابع انرژی باعث ایجاد برخی چالشها از جمله تغییرات آب و هوایی، کمبود منابع و مشکلات زیست‌محیطی شده است. ظهور و توسعه روزافزون فناوریهای جدید امکان صرفه‌جویی در مصرف انرژی و تحقق دستیابی به ساختمانهای با انرژی خالص صفر را تقریباً در هر نقطه از جهان ممکن کرده است. تمرکز اصلی در این گونه ساختمانها اولاً کاهش مصرف انرژی و سپس استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تأمین مصرف انرژی مورد نیاز در طول سال است [1]. در بین انرژیهای تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی یکی از امیدوارکننده‌ترین و قابل قبولترین مولدهای فوتوالکتریک در طراحی ساختمان با مصرف انرژی صفر است [2].

سیستمهای فتوولتائیک (Photovoltaic Systems) جزو منابع انرژی سازگار با محیط زیست هستند و در تحقیقات زیادی به استفاده از آنها در طراحی ساختمانها پرداخته شده است [3-10]. با این حال، این فناوری نوظهور دارای برخی چالشها و جنبه‌های منفی نیز می‌باشد مانند گران بودن و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه زیاد، هزینه‌های قابل توجه بهره‌برداری در طول چرخه عمر، و وابستگی شدید آن به موقعیت مکانی و شرایط آب و هوایی [11]. حقایق فوق‌الذکر منجر به نیاز به بررسی امکان‌سنجی استفاده این فناوری شده است و توجه روزافزونی را در بین محققان سراسر جهان به خود جلب کرده است. ماژولهای خورشیدی (Photovoltaic modules) به عنوان اجزای سیستم فتوولتائیک در مرحله طراحی ساختمان در نظر گرفته می‌شوند و بخشی از یا کل انرژی مورد نیاز ساختمان را پوشش می‌دهند [12]. به منظور تولید برق می‌توان ماژولهای خورشیدی را روی سقفها (پانلهای خورشیدی نصب‌شده روی پشت‌بام)، نماها، شیشه پنجره‌ها و حتی بر روی سایبانها، نصب کرد.

از نقطه نظر هندسی، دو پارامتر وجود دارد که تأثیر قابل توجهی بر راندمان تأسیسات فتوولتائیک دارند: زاویه شیب (Tilt angle) و آزیموت (Azimuth) [13, 14] به طور کلی، در تحقیقات پیشین تأکید شده است که برای به حداکثر رساندن تولید برق، زاویه شیب بهینه تقریباً برابر با عرض جغرافیایی محل است و ماژولهای فتوولتائیک باید رو به استوا باشند [15]. با این حال، ماژولهای فتوولتائیک باید در جایی نصب شوند که اثر سایه‌اندازی توسط اجسام اطراف حداقل باشد زیرا سایه‌اندازی باعث کاهش قابل

توجه راندمان می‌شود [16-18]. عبور هر چیزی که بر روی ماژولهای فتوولتائیک سایه می‌اندازد باعث کاهش خروجی جریان الکتریسیته می‌شود و از آنجایی که جریان مستقیماً با توان متناسب است، بر توان خروجی تأثیر می‌گذارد.

از طرف دیگر، با توجه به ملاحظات اقلیمی و موقعیت مکانی، نمی‌توان چشم خود را بر این واقعیت که میزان تابش خورشیدی عاملی حیاتی برای امکان‌سنجی نصب فتوولتائیک در یک مکان خاص است، بست. در یک روز روشن و آفتابی در هر نقطه از جهان (به‌استثنا قطبها) توان تابش خورشیدی حدود ۱۰۰۰ وات بر مترمربع می‌باشد، در حالی که انرژی خورشیدی که بر روی یک سطح در طی یک دوره زمانی مشخص می‌تابد، وابسته به مکان می‌باشد. علاوه بر این، تابش خورشیدی شامل تابش پراکنده و مستقیم است. در روزهای ابری، تشعشعات توسط ابرها منعکس شده و توان تابش تا ۱۰۰ وات بر مترمربع کاهش می‌یابد. علاوه بر این، دمای محیط نصب فتوولتائیک به شدت بر خروجی یک سلول خورشیدی تأثیر می‌گذارد. از آنجایی که سیستم فتوولتائیک و اجزای آن نمی‌توانند ۱۰۰ درصد نور جذب شده را به الکتریسیته تبدیل کنند، مقداری از این انرژی به صورت گرما از بین می‌رود و دمای سلول را افزایش می‌دهد؛ در نتیجه توان خروجی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد [19]. عملکرد سلولهای خورشیدی مختلف در منطقه گرمسیری سنگاپور توسط صابر و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت [20]. آنها دریافتند که جهت نصب ماژولهای فتوولتائیک در پشت‌بامهای کم شیب، تأثیر کمی بر تولید برق سالانه دارد، اما نمای شرقی و شیب پانل ۳۰ تا ۴۰ درجه به ترتیب مطلوب‌ترین مکان و شیب هستند. لئو و همکاران [15] کاربرد فتوولتائیک را برای ساختمانها در مناطق مختلف آب و هوایی در چین مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که جنوب غربی چین بهترین پتانسیل را برای دستیابی به ساختمانهای با انرژی صفر دارد.

بررسی دقیق تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که تلاش‌های گسترده‌ای در پیاده‌سازی فتوولتائیک در طراحی ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر صورت گرفته و چالشهای مرتبط با آن به‌دقت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برخی از محققان تنها بر روی حداکثر توان ممکن تولیدشده توسط فتوولتائیک در یک مکان خاص تمرکز کرده‌اند، در حالی که برخی دیگر به بررسی پارامترهای مختلف و اثرات آنها بر روند مصرف انرژی ساختمان

شهرسازی خصوصاً پارمترهای عرض معبر و ارتفاع ساختمان و همچنین اثر سایه اندازی ساختمانهای مجاور بر کاهش راندمان سیستمهای فتوولتاییک تحقیقات زیادی موجود نیست. با در نظر گرفتن همه این مسائل، یک مطالعه سامانمند برای ارزیابی استفاده از سیستمهای فتوولتاییک در دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر در اقلیم شمال ایران انجام شد. هدف این مطالعه ارزیابی به کارگیری، امکان سنجی و کاربرد ماژولهای فتوولتاییک در اقلیم معتدل و مرطوب شمال ایران است. برای این منظور اصول اساسی معماری، فرم، سیستمها و ضوابط در نظر گرفته شده برای ساخت و ساز در شرایط مختلف آب و هوایی و همچنین نیازهای انرژی بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان [۲۴] در نظر گرفته شده است.

مهمترین اهداف و نوآوری های پژوهش حاضر برای پرکردن خلأ تحقیقاتی موجود در توسعه مسائل مرتبط با انرژی در ایران به شرح زیر است:

- تحلیل حساسیت و تعیین تأثیرگذارترین متغیرها برای مدل بهینه سازی ساده سازی شده.

- در نظر گرفتن اثرات سایه اندازی ساختمانهای اطراف بر روی پانلهای فتوولتاییک و استفاده از معماری وضع موجود سقفهای ساختمان برای نصب سلولهای خورشیدی برای تولید برق.

- در نظر گرفتن شرایط اقلیمی جنوب دریای خزر برای یک ساختمان سه طبقه مسکونی شهری.

روش تحقیق

سواحل دریای خزر در شمال ایران دارای آب و هوای معتدل و بارندگی فراوان است. دمای هوا در روزهای تابستان بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی گراد و در روزهای زمستان معمولاً بالای صفر است. از ویژگیهای اصلی این اقلیم رطوبت بالا با میزان بارندگی قابل توجه است. آسمان اغلب ابری است که نور مستقیم خورشید را پراکنده می کند و راندمان ماژولهای فتوولتاییک را تحت تأثیر قرار داده و به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. برای ارزیابی پتانسیل دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر در این اقلیم، یک ساختمان مسکونی سه طبقه در شهر رشت، برای این مطالعه انتخاب شده است.

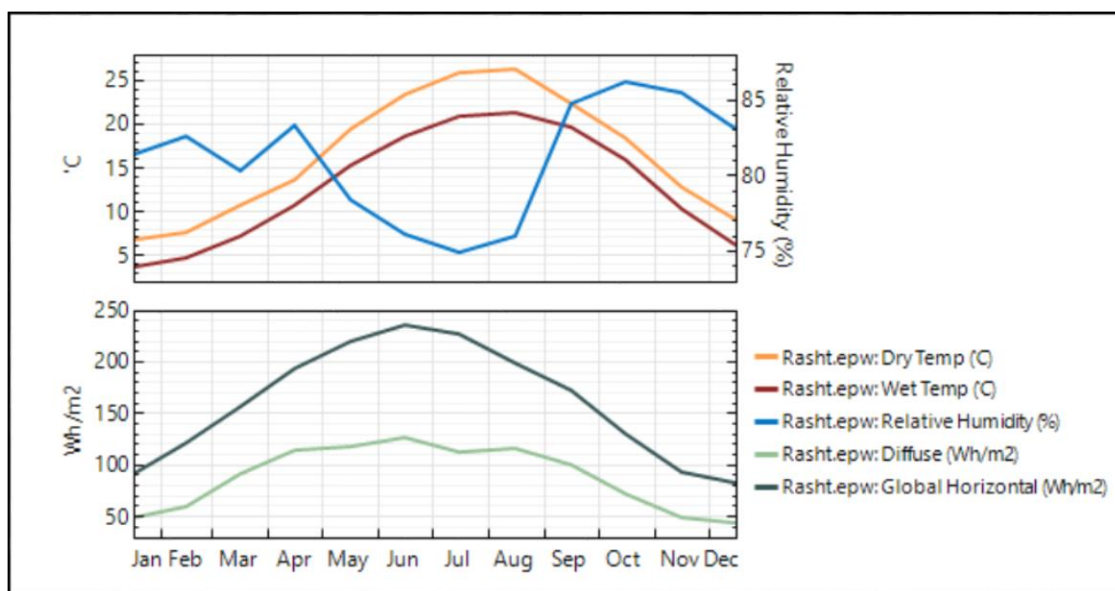
متمرکز شده اند. هوفیرکا و همکاران روشی برای ارزیابی پتانسیل فتوولتاییک در مناطق شهری ارائه کردند [21]. آنها دریافتند که تکنولوژی فتوولتاییک می تواند دو سوم مصرف برق را در یک شهر کوچک در اسلوواکی تأمین کند. ارزیابی سیستم فتوولتاییک در محل از طریق یک ابزار تخمین مبتنی بر وب در [22] توسعه داده شد. نویسندگان دریافتند که نصب تأسیسات فتوولتاییک می تواند به طور قابل توجهی به مجموع انرژیهای تجدیدپذیر مورد استفاده در اتحادیه اروپا در حال و آینده کمک کند. کاربرد سیستمهای فتوولتاییک برای ساختمانهای با انرژی صفر در مناطق مختلف آب و هوایی چین توسط لئو و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [15]. آنها دریافتند که اگر راندمان سیستم فتوولتاییک بالاتر از ۲۰٪ باشد می توان در ساختمانهای مسکونی کم ارتفاع به ساختمان با مصرف انرژی صفر را دست یافت. نمونه دیگری از چنین مطالعه ای توسط هونگ و همکاران در منطقه گانگنام در سنول، کره جنوبی ارائه گردید [23]. آنها روشی را برای تخمین پتانسیل خورشیدی در پشت بام از طریق روش تجزیه و تحلیل هیلشاید (Hillshade) با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی، جغرافیایی و فنی توسعه دادند.

طراحی سیستمهای فتوولتاییک نه تنها به شرایط آب و هوایی بلکه به مقررات معماری و شهرسازی نیز بستگی دارد. به عنوان مثال، اثرات سایه اندازی محیط پیرامون که به عرض معبر، نوع سقف (از نظر مسطح یا شیب دار)، شیب سقف شیب دار و همچنین نسبت سطح پنجره به دیوار مرتبط است، مستقیماً بر حرارت و روشنایی فضای داخل ساختمان تأثیر می گذارد. تأثیر نصب تأسیسات فتوولتاییک و نسبت سطح نورگذر به دیوار ((Window to Wall Ratio) WWR بر مشخصات انرژی یک ساختمان مهد کودک توسط مارکونینسکی و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [11]. آنها دریافتند که نسبت WWR کم (۲۵٪)، مصرف انرژی برای گرمایش فضا و آب گرم خانگی را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد گر چه بیشترین فضا برای نصب سلولهای خورشیدی (۹۹٪/۵) فراهم خواهد شد.

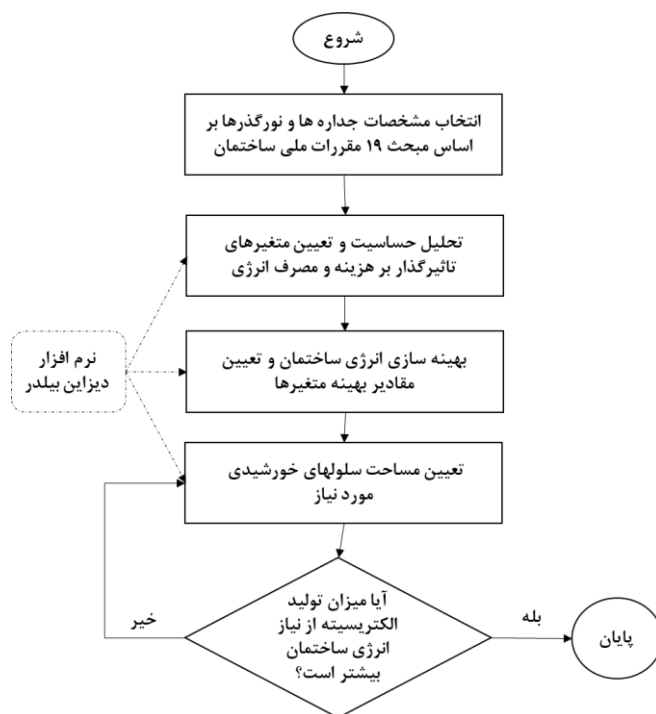
مرور تحقیقات گذشته نشان می دهد مطالعات زیادی در خصوص استفاده از سیستمهای انرژی خورشیدی در طراحی ساختمانها با مصرف انرژی خالص صفر انجام شده است لکن درخصوص تأثیرات الزامات طرحهای مدیریت شهری و

در این مطالعه ابتدا با استفاده از فرایند بهینه‌سازی، راه‌حلهای بهینه که کمترین هزینه را دارند، شناسایی می‌شوند. مدل بهینه‌سازی با هدف به حداقل رساندن مصرف برق و هزینه، دارای متغیرهای طراحی شامل اجزای جداره‌ها (دیوار و پنجره‌ها)، سایبان و روشنایی می‌باشد. ماتریس متغیرهای طراحی در شکل (۲) نشان داده شده است. مشخصات جداره‌ها و سیستم تأسیسات در مدل پایه مطابق با حداقل‌های ذکر شده در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان است. پیکربندی لایه‌های مختلف جداره‌ها به عملکرد حرارتی مورد نظر بستگی دارد و می‌توان با تغییر ضخامت عایق، هدایت حرارتی یا مقاومت حرارتی دیوارها و سقف را تغییر داد. علاوه بر این، جذب انرژی خورشیدی توسط خارجی‌ترین لایه در دیوارها باید در نظر گرفته شود. در دیوارها ضریب انتقال حرارت (U-value) به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است.

شرایط اقلیمی منطقه از جمله رطوبت زیاد و نزدیکی دمای خشک و مرطوب باعث شده است که استفاده از راهکارهای غیرفعال (Passive Solutions) برای کاهش انرژی مورد نیاز ساختمان چندان مؤثر نباشد. علاوه بر این، بسیاری از راه‌حلهای غیرفعال برای ساختمانهای شهری امکان‌پذیر نیستند، زیرا طراحی معماری آنها تابع قوانین و مقررات خاص شهری مانند جهت و عرض معابر شهری و همچنین محدودیتهای سایه‌اندازی ساختمانهای مجاور است. دمای خشک و مرطوب و رطوبت نسبی در ماههای مختلف سال برای شهر رشت در شکل (۱) نشان داده شده است. موقعیت جغرافیایی رشت ۳۷/۲۷۱۳ درجه شمالی و ۴۹/۵۹۲۱ درجه شرقی است. در این شهر طرح تفصیلی بر تمامی ساخت و سازهای شهری نظارت دارد. برای ساختمانهایی که در معابر با عرض‌های مختلف و در جهات مختلف (شمال-جنوب یا شرقی-غربی) قرار دارند، قوانین خاصی در مورد تعداد طبقات و قرارگیری در ملک وجود دارد. روش کلی این مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است که در آن مراحل دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر به طور خلاصه قابل مشاهده است.



شکل ۱ دمای خشک و مرطوب و همچنین رطوبت نسبی در ماههای مختلف سال در شهر رشت



شکل ۲ چهارچوب کلی مطالعه

جدول ۱ ماتریس متغیرهای طراحی

۰/۸ (میحث ۱۹)	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	U-values (w/m2k)	دیوار
۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	WWR North (%)	پنجره (دوجداره کم گسیل)
۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	WWR South (%)	
شیشه ۶ میل با فاصله ۱۳ میل پرشده با آرگون		شیشه ۳ میل با فاصله ۱۳ میل پرشده با آرگون		شیشه ۶ میل با فاصله ۱۳ میل پرشده با هوا		شیشه ۳ میل با فاصله ۶ میل پرشده با هوا		Glazing template
۷۰		۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	بدون سایبان	Overhang North (cm)	سایبان
۷۰		۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	بدون سایبان	Overhang South (cm)	
LED		T5(تنگستن)		CFL(مهتابی)		Lighting template		سیستم روشنایی

مصنوعی را کاهش می‌دهند. سایبانهای افقی باعث کاهش تابش خورشید به داخل فضا و جذب نور خورشید می‌شوند و در روزهای تابستان می‌توان از آن برای کاهش جذب گرمای تابشی خورشید استفاده کرد. در سراسر این تحقیق متغیرها با نمادهای زیر به کار رفته است:

مقاومت حرارتی جداره‌ها (Wall construction)، مشخصات پنجره‌ها (Glazing Type)، سیستم‌های روشنایی (Lighting template)، نسبت نورگذر به سطح دیوار در نمای شمالی (WWR North)، نسبت نورگذر به سطح دیوار در نمای جنوبی (WWR South)، طول پیش‌آمدگی سایبان شمالی (Overhang-North) و طول پیش‌آمدگی سایبان جنوبی

در خصوص جداره‌های نورگذر نیز بایستی مقدار ضریب هدایت حرارتی، ضریب جذب گرمای خورشیدی (Solar Heat Gain Coefficient) و قابلیت عبور نور (Visible Transmittance) مد نظر قرار گیرد. در این مطالعه فقط مقادیر ضریب هدایت حرارتی در نظر گرفته شده است و سایر پارامترها بر اساس فصل ۱۹ و به میزان حداقل مقادیر قابل قبول در نظر گرفته شده است. نسبت سطح نورگذر به دیوار (WWR) نیز متغیر دیگری است که در این مطالعه در نظر گرفته شده است. جدا از مسائل مربوط به زیبایی‌شناختی در طراحی، پنجره‌ها در مقایسه با دیوارهای معمولی پرهزینه‌تر هستند، اما از نظر تأمین روشنایی در روز اثرگذار بوده و نیاز به برق جهت تأمین نور

(Overhang-South).

از آنجایی که گزینه‌های زیادی برای سیستم‌های گرمایش و سرمایش برای ساختمانهای مسکونی در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد، برای سرمایش و گرمایش فضا در مطالعه حاضر از یک کولر گازی با راندمان مشخص استفاده می‌شود.

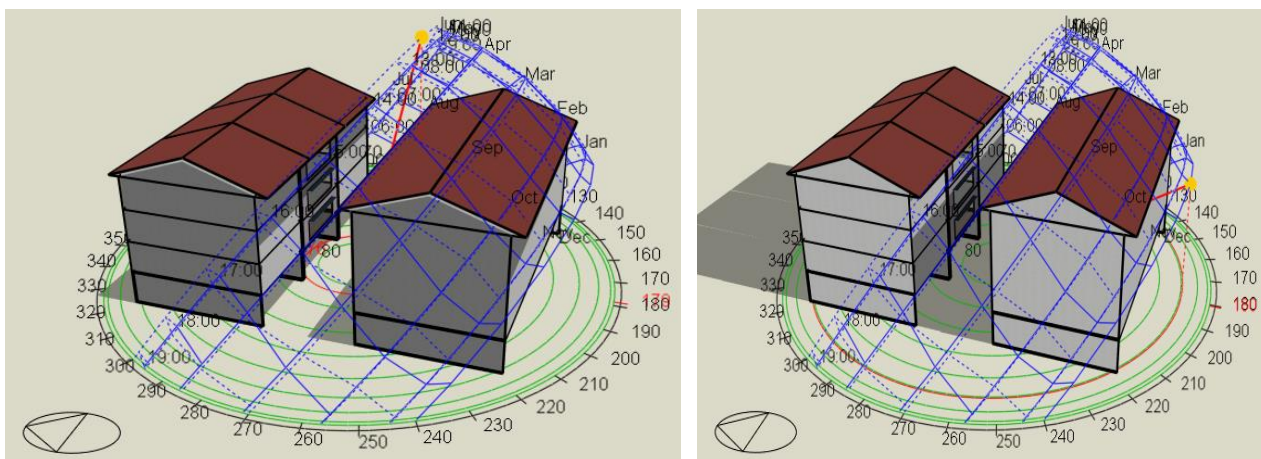
از آنجایی که فرایند بهینه‌سازی زمان‌بر است، برای ساده‌سازی و سرعت بخشیدن به فرایند بهینه‌سازی از تحلیل حساسیت برای تعیین تأثیرگذارترین پارامترهای طراحی استفاده شد. تحلیل حساسیت تأثیر عدم قطعیت‌های متغیرهای ورودی را بر متغیرهای خروجی شناسایی می‌کند. همچنین مشخص می‌کند که کدام متغیرهای درگیر در شبیه‌سازی تأثیر قابل توجهی بر اهداف بهینه‌سازی دارند و کدام متغیرها را می‌توان از فرایند بهینه‌سازی حذف کرد. پس از تحلیل حساسیت، متغیرها بر اساس درجه اهمیتی که هر متغیر بر هدف دارد، رتبه‌بندی شده و به سه دسته اهمیت زیاد، اهمیت متوسط و کم اهمیت طبقه‌بندی می‌شوند. متغیرهایی که دارای اهمیت بالا یا متوسط برای هر دو هدف هستند در فرایند بهینه‌سازی باقی می‌مانند اما اگر اهمیت کمی برای هر هدف داشته باشند، می‌توان آنها را حذف کرد. در صورتی که متغیری برای یک هدف دارای اهمیت متوسط و برای هدف دیگر اهمیت بالایی داشته باشد، حفظ یا حذف متغیر از فرایند بهینه‌سازی ساده‌سازی شده، اختیاری است.

در مسئله بهینه‌سازی ساده‌سازی شده، متغیرهای شناسایی شده در تحلیل حساسیت حفظ شده و نتایج بهینه‌سازی با نتایج شبیه‌سازی انرژی در مدل پایه مقایسه می‌شود. در مدل پایه، مشخصات جداره‌ها و سیستم‌های تأسیسات و روشنایی بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان در نظر گرفته می‌شود. بعد از بهینه‌سازی مشخصات و سیستم‌های اصلی ساختمان، برای پاسخگویی به نیاز باقی‌مانده و دستیابی به هدف تحقیق که طراحی یک ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر می‌باشد، سیستم‌های فتوولتائیک در ساختمان اعمال خواهند شد. برای این منظور ابتدا دیوار جنوبی توسط ماژول‌های فتوولتائیک پوشانده می‌شود و سپس برای پاسخگویی به تقاضای باقی‌مانده، پانل‌های فتوولتائیک بر روی سقف نصب خواهند شد.

در این مطالعه از نرم‌افزار دیزاین بیلدر برای ارزیابی کارایی انرژی ساختمان و طراحی سیستم‌های فتوولتائیک استفاده شده است. دیزاین بیلدر یک نرم‌افزار رابط کاربری گرافیکی بر پایه موتور انرژی پلاس است که خود یکی از قویترین و

گسترده‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان در جهان است و توسط وزارت انرژی ایالات متحده در اوایل سال ۱۹۹۶ طراحی و به طور مداوم بهبود یافته است [۲۵]. از دیزاین بیلدر می‌توان برای مدل‌سازی جنبه‌های مختلف مرتبط با انرژی در یک ساختمان، از جمله فیزیک ساختمان، معماری، روشنایی، سیستم‌های گرمایش و سرمایش و غیره استفاده کرد. علاوه بر تمام مزایایی که این نرم‌افزار در شبیه‌سازی انرژی ساختمان دارد، می‌توان از آن برای انجام تحلیل حساسیت، بهینه‌سازی و مدل‌سازی فتوولتائیک نیز استفاده کرد. در پژوهش حاضر از این قابلیت‌ها به خوبی استفاده شده است.

به منظور بررسی مدل پیشنهادی و تعیین پیکربندی مناسب اجزای ساختمان و تأسیسات فتوولتائیک برای دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر با در نظر گرفتن شرایط محیطی و محدودیت‌های طرح‌های شهری یک ساختمان ۳ طبقه مسکونی در شهر رشت به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد. تعداد طبقات ساختمان بر اساس طرح‌های مصوب شهری رشت و عرض معبر شهری تعریف شده در طرح تفصیلی و مطابق وضع موجود انتخاب شده است و با اهداف تحقیق که مطالعه اثر سایه‌اندازی ساختمان‌های مجاور و کاهش راندمان سیستم فتوولتائیک می‌باشد، مطابقت دارد. شکل (۳) نمای شماتیک ساختمان را نشان می‌دهد: (۳-الف) نمودار مسیر خورشید در ۲۱ دسامبر که خورشید در کمترین ارتفاع خود قرار دارد و (۳-ب) نمودار مسیر خورشید در ۲۱ جولای که خورشید در بالاترین ارتفاع خود قرار دارد. طول و عرض ساختمان به ترتیب ۱۲ و ۸ متر و ارتفاع هر طبقه ۳ متر است. به منظور مطالعه اثر سایه‌اندازی فرض شده است ساختمان دیگری دقیقاً با همین ابعاد در سمت مقابل با فاصله ۸ متر (برابر با عرض معبر طبق طرح تفصیلی) قرار دارد (همان طور که پیشتر ذکر شد تعداد طبقات و فاصله ساختمانها بر اساس طرح تفصیلی شهر رشت می‌باشد). در مدل پایه، مشخصات ساختمان مطابق با حداقل‌های مورد نیاز بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان در نظر گرفته شده است (جدول ۱). پنجره‌ها دوجداره می‌باشند با شیشه ساده با ضخامت هر شیشه ۳ میلی‌متر و فاصله ۱۳ میلی‌متری که از هوا پر شده است.



الف) نمودار مسیر خورشید در ۲۱ دسامبر که خورشید در کمترین ارتفاع خود قرار دارد
ب) نمودار مسیر خورشید در ۲۱ جولای که خورشید در بالاترین ارتفاع خود قرار دارد

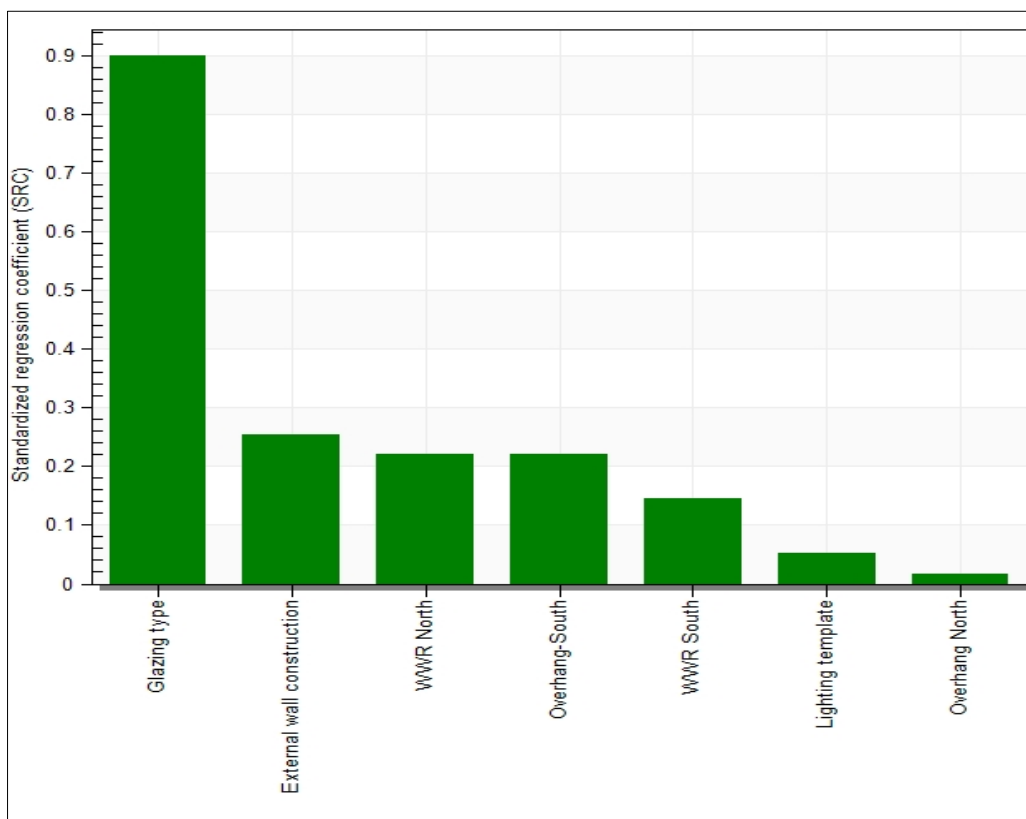
شکل ۳ نمای شماتیک ساختمان مورد مطالعه

ترتیب سطح اعتماد مدل (level of confidence) و قابلیت اطمینان (reliability) نتایج را مشخص می‌کنند. با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر، مقدار R-squared و p-value در این تحلیل به ترتیب ۰/۹۰۴ و صفر به دست آمد. تابع هدف هزینه (Cost) به شدت تحت تأثیر متغیر (Glazing) است (شکل ۴). ورودی و خروجی ارتباط مستقیم دارند. افزایش هزینه متغیر Glazing منجر به افزایش هزینه ساخت می‌شود. هزینه‌های ساخت به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر متغیر (Wall construction) نیز می‌باشند. اثر متغیرهای (WWR North)، (Overhang-South) و (WWR South) بر روی تابع هزینه متوسط است. متغیرهای (Lighting template) و (Overhang-North) تأثیر قابل توجهی بر تابع هزینه ندارند؛ بنابراین، این ورودیها را می‌توان برای این مدل بهینه‌سازی نادیده گرفت.

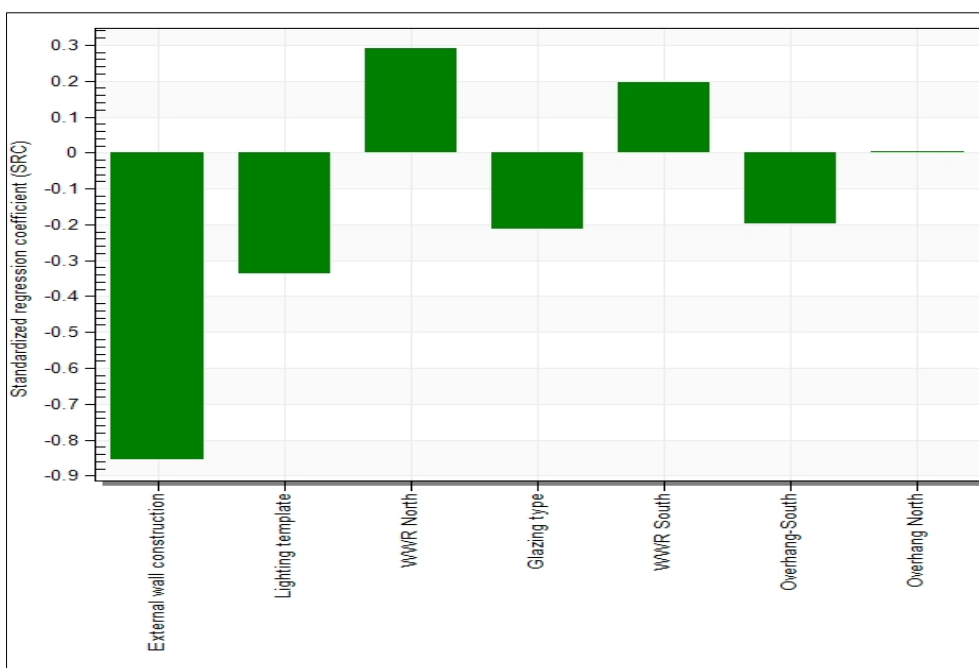
به‌منظور تأمین گرمایش و سرمایش فضا از کولر گازی با ضریب عملکرد ((COP(Coefficient of Performance)) به ترتیب ۲ و ۱۲/۵ استفاده شده است. شاخص آسایش حرارتی (PMV(Predicted Mean Vote)) بین ۰/۵ تا -۰/۵ در نظر گرفته شد. PMV شاخصی برای اندازه‌گیری آسایش حرارتی بر اساس مدل Fanger است [26]. از لامپهای LED برای تأمین نور مصنوعی استفاده شد. همچنین از دو حسگر کنترل‌کننده نور روز استفاده شد که در آستانه ۵۰۰ لوکس فعال می‌شوند. در این مطالعه از برنامه زمان‌بندی پیشنهاد شده در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، برای سیستمهای روشنایی، گرمایشی و سرمایشی استفاده شده است.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت. برای انجام تحلیل حساسیت از روش رگرسیون استفاده شده است که یک روش آماری است که رابطه بین متغیرهای ورودی را نشان می‌دهد و مشخص می‌کند که با تغییر هر یک از متغیرهای ورودی، خروجی چگونه تغییر خواهد کرد [27]. ضریب رگرسیون استاندارد شده (SRC(Standardized Regression Coefficient)) حساسیت هر کدام از متغیرهای ورودی را نشان می‌دهد و مهمترین و کم‌اهمیت‌ترین متغیرها را به ترتیب مشخص می‌نماید. سایر خروجیهای تحلیل حساسیت از جمله R-squared و p-value به



شکل ۴ نتایج تحلیل حساسیت برای تابع هدف Cost



شکل ۵ نتایج تحلیل حساسیت برای تابع هدف Electricity

نشان داده شده است. حساسیت نسبی متغیرهای ورودی به خروجی را می‌توان از مقدار SRC به دست آورد. متغیرهای ورودی به ترتیب حساسیت و اهمیت رتبه‌بندی می‌شوند و علائم مثبت و منفی نشان دهنده رابطه مستقیم یا معکوس بین آنهاست. همچنین متغیر با اهمیت زیاد با رنگ سبز، متغیر با اهمیت متوسط با رنگ زرد و متغیر با رنگ قرمز نشان داده شده است. اگر متغیر طراحی برای هر دو تابع هدف اهمیت بالا یا متوسطی داشته باشد، در فرایند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس روش تشریح شده در بخش ۲ و جدول (۲)، متغیرهای طراحی که برای فرایند بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند عبارتند از (Glazing Type)، (Wall construction)، (WWR South)، (WWR North) و (Overhang-South). بدین ترتیب متغیرهای (Lighting template) و (Overhang-North) به دلیل کم‌اهمیت بودن از فرایند بهینه‌سازی حذف شدند.

تابع هدف مصرف الکتریسیته (Electricity) به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر متغیر Wall construction است؛ اما با آن رابطه معکوس دارد به طوری که افزایش مقدار U-value در متغیر Wall construction منجر به کاهش مصرف الکتریسیته می‌شود (شکل ۵). تابع هدف Electricity همچنین به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر متغیرهای (Lighting template) و (WWR North) قرار دارد.

اثر متغیرهای Glazing Type، Overhang-South و WWR South روی تابع هدف مصرف الکتریسیته متوسط است. متغیر Overhang-North تأثیر قابل توجهی بر مصرف الکتریسیته ندارد؛ بنابراین، این متغیر را از فرایند بهینه‌سازی حذف کرد. مقادیر R-squared و p-value در این تحلیل به ترتیب ۰/۹۲۹۵ و صفر به دست آمد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود که برخی از متغیرها اهمیت بیشتری نسبت به سایرین دارند. در جدول (۲)، ضریب رگرسیون استاندارد شده (SRC) برای توابع هدف Cost و Electricity

جدول ۲ ضریب رگرسیون استاندارد شده (SRC) برای توابع هدف

مقدار SRC	تابع هدف Electricity	مقدار SRC	تابع هدف Cost	
-۰/۸۵۴۸	External wall construction	۰/۹۰۰۵	Glazing type	رتبه‌بندی اهمیت
-۰/۳۳۷۴	Lighting template	۰/۲۵۵۲	External wall construction	
۰/۲۹۱۳	WWR North	۰/۲۲۱۱	WWR North	
-۰/۲۱۲۵	Glazing type	۰/۲۲۰۶	Overhang-South	
۰/۱۹۷۶	WWR South	۰/۱۴۶۱	WWR South	
-۰/۱۹۶۵	Overhang-South	۰/۰۵۲۲	Lighting template	
۰/۰۰۲۵	Overhang North	۰/۰۱۶۱	Overhang North	

جدول ۳ مقدار متغیرها در نظر گرفته شده در مدل بهینه‌سازی و مقایسه آنها با مدل پایه

مدل بهینه	مدل پایه	متغیر طراحی
۰/۴	۰/۸	U-values (w/m2k)
۲۰	۴۰	WWR North (%)
۴۵	۴۰	WWR South (%)
شیشه ۶ میل با فاصله ۱۳ میل پرشده با هوا	شیشه ۳ میل با فاصله ۶ میل پرشده با هوا	Glazing template
بدون سایبان	بدون سایبان	Overhang North (cm)
۵۰	بدون سایبان	Overhang South (cm)

تغییرات در مشخصات ساختمان می‌تواند مصرف در هر طبقه را تا حدود ۱۹٪ کاهش دهد.

جدول ۴ میزان مصرف انرژی در مدل بهینه و مقایسه آن با مدل پایه (کیلووات ساعت در سال)

مجموع	طبقه سوم	طبقه دوم	طبقه اول	
۲۷۱۲۴	۸۲۷۰	۹۳۷۰	۹۴۸۴	مدل پایه (کیلووات ساعت)
۲۱۹۲۳	۶۶۵۶	۷۵۱۷	۷۷۵۰	مدل بهینه (کیلووات ساعت)
٪۱۹	٪۲۰	٪۲۰	٪۱۸	درصد کاهش

طراحی سیستم فتوولتائیک. برای تأمین نیاز الکتریسیته ساختمان و رسیدن به هدف اصلی که طراحی ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر است، پانل‌های فتوولتائیک در نمای جنوبی ساختمان و روی سقف شیب‌دار نصب شدند. بر اساس نتایج فرایند بهینه‌سازی، WWR روی ۴۵٪ تنظیم گردید و سطح باقی‌مانده دیوار تو سط پنلهای خورشیدی پوشانده شده و در نرم‌افزار دیزاین بیلدر مدل‌سازی شد. مشخصات پانل فتوولتائیک مطابق جدول (۵) است.

جدول ۵ مشخصات پانل‌های فتوولتائیک

TBM72-325P	نوع ماژول
۴۰x ۹۹۲ x ۱۹۵۶	ابعاد ماژول (میلی‌متر)
۳۲۵	حداکثر توان (وات)
۳۷	حداکثر ولتاژ (ولت)
۸/۷۸	حداکثر جریان (آمپر)
۴۵/۹	ولتاژ مدار باز (ولت)
۹/۱۶	جریان مدار کوتاه (آمپر)
۱۶/۷۵	بازده ماژول (٪)

بهینه‌سازی. همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، متغیرهای غیر تأثیرگذار از تحلیل بهینه‌سازی حذف شدند. پارامترهایی که برای مدل پایه و مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند در جدول (۳) ارائه شده است. بهینه‌سازی یک مفهوم پرکاربرد در مدل‌سازی انرژی ساختمان است. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد دیزاین بیلدر یک نرم‌افزار پیشرفته و کارآمد در زمینه بهینه‌سازی است و قادر است با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای شناسایی خودکار ترکیبی از گزینه‌های طراحی که به بهترین نحو توابع هدف را برآورده می‌کند، مورد استفاده قرار گیرد.

در این تحقیق، هزینه و مصرف الکتریسیته به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است. آنچه ما در تلاش برای یافتن آن هستیم، توازن بهینه بین اهدافی است که معمولاً در تضاد هستند به عنوان مثال مصرف انرژی با افزایش راندمان تجهیزات و مقاومت حرارتی مصالح کاهش می‌یابد اما ممکن است استفاده از این راهکارها پرهزینه باشد. الگوریتم ژنتیک به طور هوشمند راه‌حلهایی را انتخاب می‌کند که به بهترین وجه با اهداف طراحی مطابقت دارند و قویترین موازنه را بین راه‌حلهای ممکن فراهم می‌آورد.

نتایج بهینه‌سازی در جدول (۳) نشان داده شده و با مدل موردی پایه مقایسه شده است. در مدل بهینه‌سازی U-value دیوار، WWR در نماهای شمالی و جنوبی، سایبان جنوبی و نوع پنجره به ترتیب ۰/۴، ۲۰٪، ۴۵، ۵۰ سانتی‌متر و پنجره دوجداره با شیشه ساده ۳ میلی‌متری به فاصله ۶ میلی‌متر پر شده با هوا در نظر گرفته شده است؛ ترکیبی که کمترین هزینه و مصرف را برای ساختمان مورد نظر دارد.

جدول (۴) مصرف انرژی در طبقات مختلف ساختمان را در حالت پایه و مدل بهینه نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشخص است میزان مصرف انرژی در طبقات مختلف متفاوت است. طبقه اول بیشترین مصرف انرژی را دارد که می‌توان آن را به اثر سایه‌اندازی ساختمان مقابل و جریان هوای آزاد از زیر همکف نسبت داد. طبقه سوم نیز کمترین مصرف را دارد که دلیل آن می‌توان به وجود سقف شیب‌دار به عنوان فضای کنترل نشده قلمداد کرد. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که اعمال برخی

کاهش راندمان از ماه می تا سپتامبر که زاویه ارتفاع خورشید بیشتر است مشهودتر است (شکل ۳). میزان تولید الکتریسیته برای حالتی که هیچ سایه‌اندازی روی سطوح وجود ندارد نیز در شکل (۶) نمایش داده شده است.

پس از بررسی نتایج ناشی از نصب پانلهای خورشیدی روی نمای جنوبی ساختمان، نصب پانلها بر روی سقف ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل بارندگی و برف زیاد منطقه، سقف ساختمانها به صورت شیب‌دار با شیب بین ۲۰ تا ۴۰ درجه به سمت جنوب و شمال اجرا می‌شود. میزان تولید برق توسط سلولهای خورشیدی نصب شده برای سقفهای شیب‌دار رو به جنوب و شمال با شیبهای مختلف در شکل (۷) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، حداکثر توان خروجی در پانلهای رو به جنوب در زاویه ۳۵ درجه اتفاق افتاده است که نزدیک به عرض جغرافیایی محل بوده و نتایج تحقیقات گذشته را تأیید می‌کند [28]. لکن برای کل سیستم، حداکثر توان خروجی در شیب ۲۰ درجه رخ داده است. چرا که افزایش شیب پانلهای خورشیدی نصب شده به سمت شمال توان خروجی آنها را کاهش می‌دهد، لذا در مجموع حداکثر توان تولید شده در پشت بام در زاویه ۲۰ درجه رخ خواهد داد.

در جدول (۷) تولید برق سیستم خورشیدی نصب شده در پشت بام و نمای ساختمان نشان داده شده است. همان طور که از جدول مشخص است، سلولهای خورشیدی نصب شده در سقف شیب‌دار رو به جنوب بیشترین توان (۹۷۴۵ کیلووات ساعت) و سلولهای نصب شده در نمای طبقه اول کمترین توان را تولید کردند (۷۱۸/۷ کیلووات ساعت).

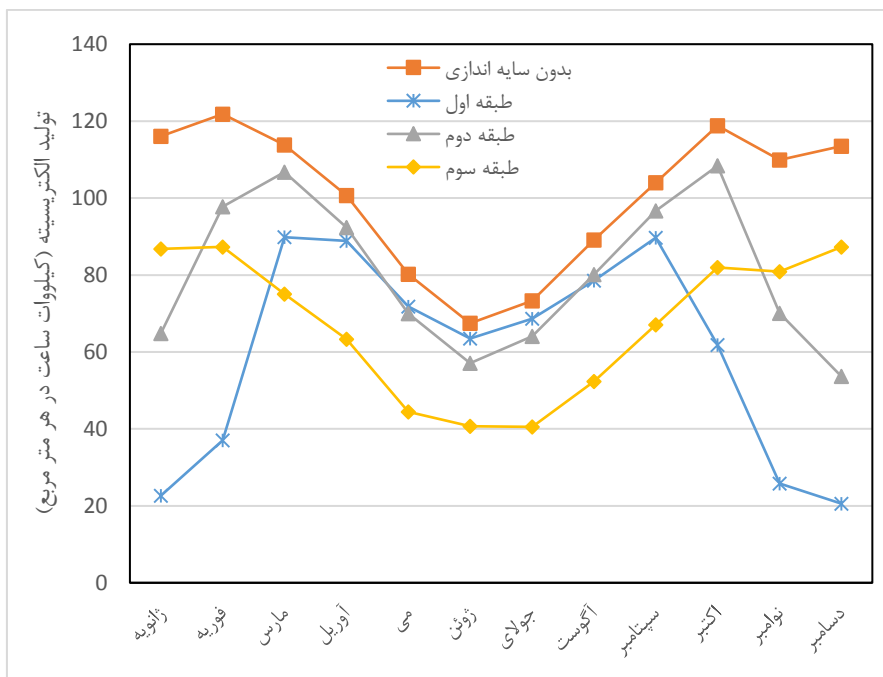
در این تحقیق سیستم فتوولتائیک به صورت متصل به شبکه در نظر گرفته شده است و ظرفیت باتری به گونه‌ای انتخاب شده است تا بتواند در دور روز متوالی بدون حضور الکتریسیته خورشیدی، نیاز ساختمان را تأمین کند. ظرفیت کل باتریها ۲۸ کیلووات ساعت و توان ماکزیمم تخلیه و شارژ به ترتیب ۲۰۰۰ و ۱۵۰۰ در نظر گرفته شده است.

جدول (۶) میزان برق تولید شده توسط پانلهای خورشیدی نصب شده در نمای هر طبقه را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، اثر سایه‌اندازی کاملاً مشهود است. در طبقه اول اثر سایه‌اندازی ساختمان مقابل باعث کاهش تولید برق شده است و در طبقه سوم اگرچه ساختمان مقابل بر نما سایه نمی‌اندازد، اما اثر سایه سقف شیب‌دار ساختمان (دامنه سقف) در ماههای گرم سال که زاویه تابش خورشید زیاد است (به شکل ۶ رجوع شود)، باعث ایجاد سایه‌اندازی روی پانلهای نصب شده در نما و کاهش تولید برق شده است. تولید الکتریسیته در حالتی که هیچ گونه سایه‌اندازی روی پانلهای خورشیدی وجود ندارد نیز در این جدول ارائه شده است. می‌توان دریافت که نصب سلولهای خورشیدی با مشخصات فوق در این منطقه در حالت عمودی می‌تواند حداکثر ۱۱۴/۷ کیلووات ساعت بر مترمربع سطح سلول خورشیدی، برق تولید کند.

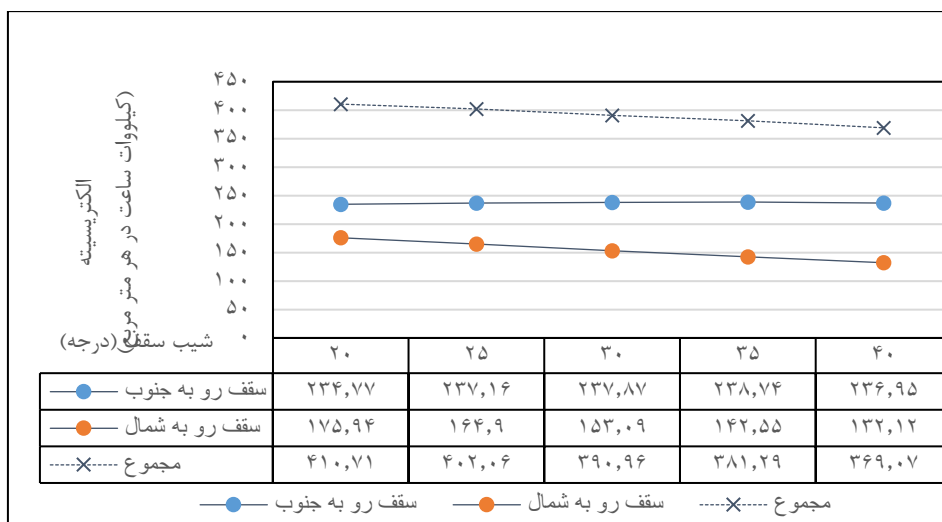
شکل (۶) مقدار برق خورشیدی تولید شده توسط سلولهای خورشیدی نصب شده در نمای طبقات را در طول ماههای مختلف سال نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، اثر سایه‌اندازی ساختمان مقابل در طبقه اول، راندمان تولید سلولهای خورشیدی را به شدت کاهش داده است. در طبقه سوم، اثر سایه‌زنی سقف شیب‌دار باعث کاهش تولید برق شده است. این

جدول ۶ میزان تولید الکتریسیته فتوولتائیک در نمای ساختمان

بدون سایه‌اندازی	نمای طبقه سوم	نمای طبقه دوم	نمای طبقه اول	
۱۲۳۹	۸۰۸	۹۶۲	۷۱۸/۷	تولید الکتریسیته (کیلووات ساعت)
۱۱۴/۷	۷۴/۸	۸۹/۱	۶۶/۵	تولید الکتریسیته (کیلووات ساعت در واحد سطح)



شکل 6. برق تولید شده در نمای ساختمان در واحد سطح در ماه‌های مختلف سال



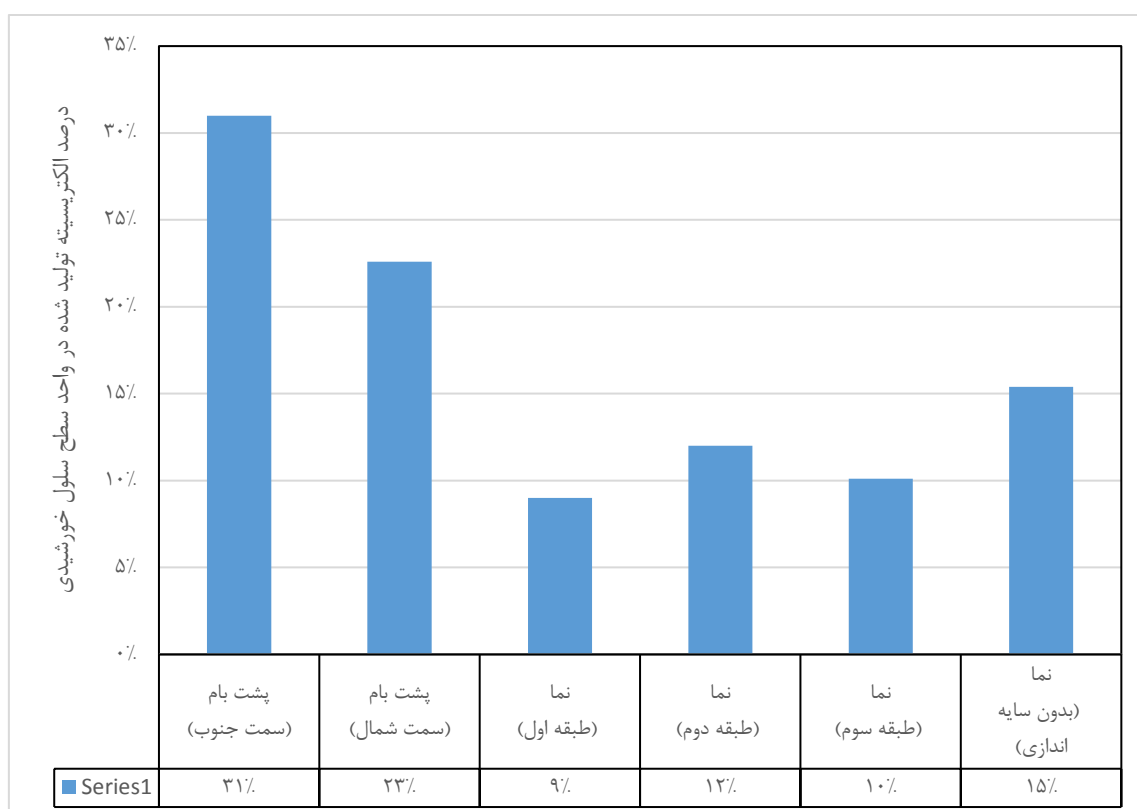
شکل 7. برق تولید شده توسط سلولهای خورشیدی نصب شده در سقف شیب‌دار در واحد سطح

جدول 7. سهم هر کدام از بخشهای مختلف تولید الکتریسیته خورشیدی

محل نصب سیستم فتوولتائیک	الکتریسیته تولیدشده (کیلووات ساعت در سال)
سقف شیب‌دار رو به جنوب	9745
سقف شیب‌دار رو به جنوب	7107
نمای طبقه اول	7187
نمای طبقه دوم	962
نمای طبقه سوم	808
بدون سایه‌اندازی	1239

ساختمان در سه طبقه برابر با ۲۱۹۲۳ کیلووات ساعت در سال و میزان تولید برق برابر با ۱۹۳۴۱ کیلووات ساعت در سال می‌باشد. در نتیجه، دستیابی به ساختمانی با انرژی خالص صفر عملاً برای کل ساختمان غیر ممکن است لکن برای هر یک از طبقات به طور جداگانه با ترکیب سلولهای خورشیدی در پشت بام و نما می‌توان انرژی مورد نیاز ساختمان را با نصب سیستمهای خورشیدی تأمین کرد.

در شکل (۸) سهم هر یک از سیستمهای خورشیدی در واحد سطح نصب شده در ساختمان نشان داده شده است. همان طور که از شکل مشاهده می‌شود، نصب سلولهای خورشیدی بر روی پشت بام بیشترین راندمان و در نمای طبقه اول کمترین راندمان را خواهد داشت. در جدول (۸) ترکیب مولدها فتوولتائیک مختلف برای دستیابی به ساختمانی با انرژی خالص صفر مشاهده می‌شود. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود کل مصرف



شکل ۸ سهم هر کدام از بخشهای مختلف تولید الکتریسیته خورشیدی در واحد سطح

جدول ۸ ترکیب بخشهای مختلف تولید کننده الکتریسیته خورشیدی برای دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی صفر

کل مصرف الکتریسیته (کیلووات ساعت)	کل تولید الکتریسیته (کیلووات ساعت)	سقف شیب‌دار رو به شمال (کیلووات ساعت)	سقف شیب‌دار رو به جنوب (کیلووات ساعت)	نمای ساختمان (کیلووات ساعت)	
۶۶۵۶	۱۷۵۷۰/۷	۷۱۰۷	۹۷۴۵	۷۱۸/۷	طبقه اول
۷۵۱۷	۱۷۸۱۴			۹۶۲	طبقه دوم
۷۷۵۰	۱۷۶۶۰			۸۰۸	طبقه سوم
۲۱۹۲۳	۱۹۳۴۱			۲۴۸۹	مجموع

نتیجه گیری

در این مقاله با رعایت تمامی ملاحظات موجود و رعایت تمامی الزامات قانونی و فنی، امکان طراحی ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر در منطقه جنوب دریای خزر مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا، پیکربندیهای مختلف ساختمان برای به حداقل رساندن نیاز الکتریسیته ساختمان برای متغیرهای طراحی مانند دیوارها، پنجره‌ها، سایبان و سیستم روشنایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. قبل از بهینه‌سازی، برای کاهش تعداد متغیرها و در نتیجه کاهش زمان بهینه‌سازی، تحلیل حساسیت متغیرها انجام شد. پس از انتخاب مشخصات و سیستم ساختمان، پانلهای خورشیدی در نمای جنوبی نصب شد تا حداکثر برق ممکن تولید شود. در نهایت، با نصب پانلهای خورشیدی در پشت بام ساختمان، سعی شد تا نیاز انرژی باقی‌مانده ساختمان برای رسیدن به ساختمان با مصرف انرژی خالص صفر تأمین شود.

- نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که دیوارهای خارجی، پنجره، نسبت سطح نورگذر به دیوار و سایبان جنوبی تأثیرگذارترین متغیرها هستند که هم بر مصرف انرژی ساختمان و هم هزینه سرمایه‌گذاری تأثیر می‌گذارند.

- نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با انتخاب مقادیر بهینه متغیرها، مصرف برق تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. با استفاده از پانلهای خورشیدی نصب شده در نما و پشت بام $۸۸/۲\%$ از نیاز برق ساختمان تأمین خواهد

مراجع

- [1] S. S. Rezaeinasab, A. Taefi nasrabadi, S. Asadi, and S. A. Haj seiyed taghia, "Investigating the probability of designing net-zero energy buildings with consideration of electric vehicles and renewable energy," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 29, pp. 4061-4087, 2021.
- [2] W. Wu and H. M. Skye, "Residential net-zero energy buildings: Review and perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 142, pp. 110859, 2021.
- [3] L. Wells, B. Rismanchi, and L. Aye, "A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context," *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 616-628, 2018.
- [4] G. Tiwari, R. Mishra, and S. Solanki, "Photovoltaic modules and their applications: a review on thermal modelling," *Applied Energy*, vol. 88, no. 7, pp. 2287-2304, 2011.
- [5] K. Sudhakar, M. Winderla, P. Maximilian, and S. S. Sudhakar, "Net-zero building designs in hot and humid climates: A state-of-art," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol.13, pp. 100400, 2019.

- [6] A. Scognamiglio and H. R. Røstvik, "Photovoltaics and zero energy buildings: a new opportunity and challenge for design," *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS*, vol. 21, no. 6, pp. 1319-1336, 2013.
- [7] Y. Lu, S. Wang, and K. Shan, "Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings," *Applied Energy*, vol. 155, pp. 463-477, 2015.
- [8] C. Good, I. Andresen, and A. G. Hestnes, "Solar energy for net zero energy buildings—A comparison between solar thermal, PV and photovoltaic–thermal (PV/T) systems," *Solar Energy*, vol. 122, pp. 986-996, 2015.
- [9] A. Chel and G. Kaushik, "Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 2, pp. 655-669, 2018.
- [10] D. Aelenei, L. E. Aelenei, E. Musall, and E. Cubi, "Design strategies for non-residential zero-energy buildings: lessons learned from Task40/Annex 52: towards net zero-energy solar buildings," in *CLIMA 2013-11th REHVA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC* (Pregue, Czech Republic), 2013.
- [11] J. Marchwiński and K. Kurtz-Orecka, "Effect of photovoltaic installation power and façade glazing ratio on the energy performance of a nursery building," *Engineering, Construction and Architectural Management*, Vol. 30, pp. 1463-1480, 2022.
- [12] S. Asadi, M. Nazari-Heris, S. S. Rezaeinasab, H. Torabi, M. Sharifironizi, "An updated review on net-zero energy and water buildings: Design and operation," *Food-Energy-Water Nexus Resilience and Sustainable Development: Decision-Making Methods, Planning, and Trade-Off Analysis*: Springer, pp. 267-290, 2020. [E-book] Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40052-1_12.
- [13] A. K. Yadav and S. Chandel, "Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 503-513, 2013.
- [14] A. Shariah, M. A. Al-Akhras, and I. Al-Omari, "Optimizing the tilt angle of solar collectors," *Renewable Energy*, vol. 26, no. 4, pp. 587-598, 2002.
- [15] C. Liu, W. Xu, A. Li, and D. Sun, "Energy balance evaluation and optimization of photovoltaic systems for zero energy residential buildings in different climate zones of China," *Journal of Cleaner Production*, vol. 235, pp. 1202-1215, 2019.
- [16] Y. J. Wang and P. C. Hsu, "An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells," *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 3069-3078, 2011.
- [17] R. K. Pachauri, I. Kansal, T. S. Babu, and H. H. Alhelou, "Power losses reduction of solar PV systems under partial shading conditions using re-allocation of PV module-fixed electrical connections," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 94789-94812, 2021.
- [18] D. Fares, M. Fathi, I. Shams, and S. Mekhilef, "A novel global MPPT technique based on squirrel search algorithm for PV module under partial shading conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 230, pp. 113773, 2021.
- [19] J. Fan, L. Wu, F. Zhang, H. Cai, X. Ma, and H. Bai, "Evaluation and development of empirical models for estimating daily and monthly mean daily diffuse horizontal solar radiation for different climatic regions of China," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 105, pp. 168-186, 2019.

- [20] E. M. Saber, S. E. Lee, S. Manthapuri, W. Yi, and C. Deb, "PV (photovoltaics) performance evaluation and simulation-based energy yield prediction for tropical buildings," *Energy*, vol. 71, pp. 588-595, 2014.
- [21] J. Hofierka and J. Kaňuk, "Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools," *Renewable energy*, vol. 34, no. 10, pp. 2206-2214, 2009.
- [22] M. Šúri, T. A. Huld, E. D. Dunlop, and H. A. Ossenbrink, "Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries," *Solar energy*, vol. 81, no. 10, pp. 1295-1305, 2007.
- [23] T. Hong, M. Lee, C. Koo, K. Jeong, and J. Kim, "Development of a method for estimating the rooftop solar photovoltaic (PV) potential by analyzing the available rooftop area using Hillshade analysis," *Applied Energy*, vol. 194, pp. 320-332, 2017.
- [24] "Iranian National Code, chapter 19: Energy Conservation," 2020; Available: <https://www.bhrc.ac.ir/nbri/>. [Accessed Oct.12, 2022]. (In Persian)
- [25] B. S. Pawar and G. Kanade, "Energy optimization of building using design builder software," *International Journal of New Technology and Research*, vol. 4, pp. 263152, 2018.
- [26] F. R. d'Ambrosio Alfano, B. W. Olesen, B. I. Palella, and D. Pepe, "Fifty years of PMV model: Reliability, implementation and design of software for its calculation," *Atmosphere*, vol. 11, no. 1, pp. 49, 2020.
- [27] B. Iooss, and P. Lemaître, "A review on global sensitivity analysis methods," *Uncertainty management in simulation-optimization of complex systems*: Springer, vol. 59, pp. 101-122, 2015. [E-book] Available: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7547-8_5.
- [28] Z. Elhassan, M. Zain, and K. Sopian, "Output energy of photovoltaic module directed at optimum slope angle in Kuala Lumpur, Malaysia," *Applied science*, vol. 6, no. 2, pp. 104-9, 2011.