



## ORIGINAL RESEARCH PAPER

## The design pattern of optimal combined envelope in generating solar electricity using genetic algorithm in Iran's cold climate\*

Alireza Farhangi Khanghah<sup>1, \*</sup>, Yousef Gorji Mahlabani<sup>2,\*\*</sup>, Seyed Majid Mofidi Shemirani<sup>3,</sup>, Hossein Medi<sup>4,</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Architecture and Urbanism, Payam-Noor University, Iran.

<sup>2</sup> Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>4</sup> Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

## ARTICLE INFO

## Article History:

Received	2020/08/03
Revised	2020/09/21
Accepted	2020/10/18
Available Online	2021/12/22

## Keywords:

Facade Integrated Photovoltaic  
Combined Envelope  
Flat Reflector  
Genetic Algorithm  
Electrical Efficiency

## Extended ABSTRACT

**BACKGROUND AND OBJECTIVES:** According to the International Energy Agency, the construction sector accounts for more than 33 percent of total energy consumption per capita as the largest energy consumer globally, while in Iran, the share is accounting for 40 percent. Meanwhile, the loss of nearly 11 percent of electrical energy while transmitting it through grid lines to cities has led to the rapid growth of a decentralized generation of electricity at end-use through building integrated photovoltaic (BIPV) systems over the past fifteen years. Exposing to the Sun, façades have great potential to supply the electricity needs of energy-efficient buildings using photovoltaic panels. However, the improper orientation to the radiation direction, especially in summer, reduces the efficiency of PV panels integrated into the facades. Aiming to increase the efficiency of the southern BIPV's facade, this research introduces an optimal combined pattern of PV panels and flat reflectors as an integrated system capable of improving both the intensity and the area of solar irradiation on panels.

**METHODS:** The research has an applied approach, and the method of the research is founded on experimental and simulation models. Research tools used in the study process include descriptive geometry to analyze solar radiation and reflection on the panels, study models to consider the reflections, and Grasshopper plugin in Rhino software environment as a parametric tool to simulate the proposed integrated envelope. Ladybug plugin has also been used to extract solar radiation properties from the climate information file generated by Meteonom software. At first, the experimental and analytical method was used to find the best concept for the combination, and then the logical reasoning method was applied to select the best pattern among the possible alternatives for a combined, concentrated photovoltaic facade. At the second stage, defining the constructing parameters, the proposed envelope is simulated aiding Grasshopper software. The parameters are optimized using the genetic algorithm through the Octopus plugin. At the third and final stage, input data, related to the index days, entered to the algorithm and optimization process was done so that the best values have been introduced for each input data to fulfill the research objectives. Then through a comparative process the best setting for each month, and finally for the entire year was selected and introduced.

**FINDINGS:** Having determined the optimum constructing parameters, the study calculated the proposed geometry output efficacy. The results showed significant increase in output power up to 87.38% in summer (June 21), 36.33% in spring (March 21), and 17.83% in winter (December 21) with an average of 46.44% during the year. The findings of the study addressed the six main parameters of the combined envelope influencing the efficiency. These parameters can be divided into two groups based on their effect. The first group includes lateral angle of side mirrors, lateral angle of underneath mirrors, horizontal depth of side mirrors with 52.75, 47.75, and 39.25 percent impact on "surface area of radiation" and with 64.5, 39.33, and 51.75 percent effect on the "increase

Use your device to scan  
and read the article online



Number of References

28



Number of Figures

17



Number of Tables

7

© 2021, JIAU. All rights reserved.

<https://dx.doi.org/10.30475/isau.2020.241977.1473>

OPEN ACCESS

\* This article is derived from the first author's doctoral thesis entitled "High-efficient solar envelopes' design applying a hybrid system (LCBIPV) in Iran cold climate ", supervised by the second and third authors and advised by the fourth, at Imam Khomeini International University(IKIU).

\*\* Corresponding Author:  
Email: [gorji@arc.ikiu.ac.ir](mailto:gorji@arc.ikiu.ac.ir)  
Phone: +98(912)8802265

**Extended ABSTRACT**

in radiation intensity” respectively. The second group, meant, the number of panels in the vertical direction, side mirrors slope angle and the underneath mirrors ‘slope angle with 34.75, 23.25 and 18.75 percent of the impact on “the area of radiation” respectively, and 10.5, 15, and 13.7 percent of the effect on the “increase in radiation intensity” are at the fourth to sixth order of influence on the proposed envelope- efficiency. It’s proved that changing the most vital parameters affect the amount of “increase in radiation” up to 64.14% and cause 62.21% variation on “increasing the area of reflection” values while for the least influencing parameters, these items were calculated 15.85% and 15.90%, respectively.

**CONCLUSION:** Facades integrated photovoltaic panels have low efficiencies due to the non-optimal angle of the building envelope to the radiation, especially in summer. On the other hand, the need to design openings, particularly in the southern facade of the building, reduces the solar system’s efficiency by reducing the area of installable panels. In this study, the strategy of combining a flat reflector with PV panels in the form of a novel geometry was used to form the main idea to increase the efficiency of BIPVs. In this research, the two main criteria meant, radiation intensity and the area of reflection, were considered as objective functions in optimization. The results showed that using the proposed integrated system during the year will increase the radiation intensity by an average of 38.8% and the reflection area by 46.70%. However, they will improve, in order, up to 71.41% and 100.53% in summer. In other words, using the proposed model, about 30% of the southern facade surface can be allocated to openings, and at the same time, the irradiated surface during the year is considered equal to the total facade surface. The study showed that the electrical output power in summer, using the proposed model, will increase to 88%, and for the two seasons of winter and spring, it will be 17.84 and 34.36%, respectively. The study showed that the proposed geometry could be introduced as a practical solution to enhance the façade integrated photovoltaic efficiency. So, it is capable of generating more electricity, especially in the cold climate of Iran.

**HIGHLIGHTS:**

- An integrated envelope including PV panels and flat reflectors has the capability of enhancing building façades in generating required electricity.
- Using a parametric geometry in an algorithmic simulation for the proposed envelope will provide the ability of assessing the capacity of combined envelope in any given time of a year.
- From the six main constructing parameters of the proposed envelope, the three including lateral angle of side mirrors, lateral angle of underneath mirrors, horizontal depth of side mirrors have the main effect on the efficiency of the integrated envelope.

**ACKNOWLEDGMENTS:**

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-forprofit sectors.

**CONFLICT OF INTEREST:**

The authors declared no conflicts of interest.

**COPYRIGHTS**

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

Farhangi Khanghah, A.; Gorji Mahlabani, Y.; Mofidi Shemirani, M.; Medi, H., (2021). The design pattern of optimal combined envelope in generating solar electricity using genetic algorithm in Iran’s cold climate. *Journal of Iranian Architecture & Urbanism.*, 12(2): 83-101.



<https://dx.doi.org/10.30475/isau.2020.241977.1473>



[https://www.isau.ir/article\\_120746.html](https://www.isau.ir/article_120746.html)



## الگوی طراحی پوسته تلفیقی بهینه در تولید برق خورشیدی با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک در اقلیم سرد ایران\*

علیرضا فرهنگی خانقاه<sup>۱</sup>، یوسف گرجی مهلبانی<sup>۲\*</sup>، سید مجید مفیدی شمیرانی<sup>۳</sup>، حسین مدی<sup>۴</sup>

۱. استادیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه پیام نور، ایران  
 ۲. استاد، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.  
 ۳. استادیار، گروه معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.  
 ۴. استادیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

### چکیده

### مشخصات مقاله

تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز در ساختمان‌های انرژی‌کارا توسط خود بنا یکی از راهبردهای توصیه‌شده در کاهش سهم عمده بخش ساختمان در کل سرانه مصرف انرژی است؛ در این بین سامانه‌های پیل خورشیدی یکپارچه با پوسته بنا به دلیل قرارگیری در سطح بیرونی ساختمان موقعیت ممتازی در تولید الکتریسیته دارند اما تغییرات زیاد شدت و جهت تابش نور خورشید در طی فصول و در طول روز باعث کاهش بازده این سامانه‌ها می‌شود. این پژوهش که بستر مطالعاتی آن اقلیم سرد ایران است، نشان می‌دهد که طراحی الگوریتمیک یک پوسته تلفیقی از ترکیب بازتابنده تخت و پیل خورشیدی بر اساس الگوی تابش راهکاری کارآمد در افزایش بازده الکتریکی پوسته به‌ویژه در فصل تابستان است. پژوهش از منظر ماهیت در دسته تحقیقات کمی از بُعد هدف، کاربردی و از جهت روش در زمره پژوهش‌های توصیفی - شبیه‌سازی قرار دارد. در این تحقیق از افزونه گرس‌هاپر برای پیاده‌سازی الگوی مولد پوسته و از الگوریتم ژنتیک در روند بهینه‌سازی استفاده‌شده و روند رسیدن از سؤال به جواب با روش استدلال منطقی انجام‌شده است. در این پژوهش افزایش بازده سامانه پیشنهادی به میزان ۸۷/۳۸ درصد در ابتدای فصل تابستان، ۳۶/۳۳ درصد در شروع فصل بهار و ۱۷/۸۳ درصد در آغاز فصل زمستان با میانگین ۴۶/۴۴ درصد در طول سال محاسبه شد. یافته‌های پژوهش شش مؤلفه اصلی سازنده پوسته تلفیقی را در تعیین بازده آن مؤثر دانست که به ترتیب تأثیر عبارت‌اند از زاویه شیب عرضی بازتابنده‌های طرفینی، زاویه شیب عرضی بازتابنده‌های زیرین، عمق افقی بازتابنده‌های کناری، تعداد تقسیمات پوسته در امتداد قائم، شیب طولی بازتابنده‌های کناری و در نهایت کمترین تأثیر که مربوط به شیب طولی بازتابنده‌های زیرین است؛ به طوری که درصد تأثیر مهم‌ترین مؤلفه بر افزایش شدت تابش ۶۴/۱۴ درصد و بر افزایش سطح بازتابش ۶۲/۲۱ درصد به دست آمد و برای کم‌اثرترین مؤلفه بر بازده این مقادیر به ترتیب ۱۵/۸۵ و ۱۵/۹۰ درصد محاسبه گردید.

تاریخ ارسال ۱۳۹۹/۰۵/۱۳  
 تاریخ بازنگری ۱۳۹۹/۰۶/۳۱  
 تاریخ پذیرش ۱۳۹۹/۰۷/۲۷  
 تاریخ انتشار آنلاین ۱۴۰۰/۱۰/۰۱

### واژگان کلیدی

نمای یکپارچه با پیل خورشیدی  
 پوسته تلفیقی  
 بازتابنده تخت  
 الگوریتم ژنتیک  
 بازده الکتریکی

### نکات شاخص

- پوسته تلفیقی مرکب از صفحات پیل خورشیدی و بازتابنده تخت قابلیت افزایش کارایی نمای ساختمان در تولید الکتریسیته مورد نیاز را دارا است.  
 - استفاده از هندسه پارامتریک در روند شبیه‌سازی الگوریتمیک پوسته، امکان ارزیابی قابلیت‌های پوسته تلفیقی را در هر ساعت از سال فراهم خواهد کرد.  
 از شش مؤلفه اصلی سازنده پوسته تلفیقی، سه مؤلفه یعنی زاویه شیب عرضی بازتابنده‌های طرفینی، زاویه شیب عرضی بازتابنده‌های زیرین و عمق افقی بازتابنده‌های کناری بیشترین تأثیر را در بازده سامانه دارند.

### نحوه ارجاع به مقاله

فرهنگی خانقاه، علیرضا؛ گرجی مهلبانی، یوسف؛ مفیدی شمیرانی، سید مجید و مدی، حسین. (۱۴۰۰). الگوی طراحی پوسته تلفیقی بهینه در تولید برق خورشیدی با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک در اقلیم سرد ایران، نشریه علمی معماری و شهرسازی ایران، ۱۲(۲)، ۱۰۱-۸۳.

\* این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده نخست با عنوان «طراحی پوسته‌های بیش‌بازده خورشیدی با سامانه تلفیقی در اقلیم سرد ایران» می‌باشد که به راهنمایی نویسنده دوم و سوم و مشاوره نویسنده چهارم در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۵)</sup> انجام گرفته است.

\* نویسنده مسئول

تلفن: ۰۰۹۸۹۱۲۸۸۰۲۲۶۵

پست الکترونیک: [gorji@arc.ikiu.ac.ir](mailto:gorji@arc.ikiu.ac.ir)

## مقدمه

با پوسته خورشیدی مولد الکتریسیته است، بنابراین و با توجه به مسئله پژوهش، این تحقیق به دنبال یافتن پاسخ به این سؤال است که: هندسه بهینه تلفیق بازتابنده تخت با پیل خورشیدی در نمای جنوبی ساختمان چیست و اثر آن بر توان خروجی از سامانه چقدر است؟ بدین منظور و باهدف یافتن یک الگوی بهینه مبتنی بر مؤلفه‌های<sup>۲</sup> مولد پوسته تلفیقی از یک الگوی پارامتریک<sup>۳</sup> در شکل‌گیری پوسته استفاده شده و پس از بهینه‌سازی تأثیر آن بر بازده سامانه بررسی و نتیجه‌گیری شده است.

## پیشینه پژوهش

افزایش شدت تابش رسیده به سطح پیل خورشیدی با استفاده از تشدیدکننده‌های نوری<sup>۴</sup> و بازتابنده‌ها<sup>۵</sup> یکی از راه‌کارهای شناخته شده در این زمینه است (Kumar, Kaushik, & Garg, (Tabor, 1958, p. 33) Arshad, Tariq, Niaz, & Jamil, (1995, p. 511)؛ (2014, p. 292)؛ (Tabaei & Ameri, 2015, p. 52)؛ (Abu-Bakar, et al., 2016, p. 3)؛ این روش همچنین باعث افزایش استفاده از سطح پیل نیز می‌گردد؛ از آنجاکه تشدید اشعه تابشی موجب افزایش دمای پوسته شده و این امر به نوبه خود باعث کاهش توان خروجی از سامانه می‌شود لذا بهره‌مندی از ترکیب بازتابنده‌های با توان تشدیدکنندگی کمتر همانند بازتابنده‌های تخت با پوسته نما می‌تواند علاوه بر حل مشکل شدت تابش، مانع از افزایش بیش از حد دمای پوسته خورشیدی شود (Fraas & Partain, 2010, p. 275)؛ (Siahaan & Siswono, 2019, p. 952).

از جمله مطالعات انجام شده در زمینه افزایش توان خروجی پیل خورشیدی در ترکیب با بازتابنده تخت یک تحقیق میدانی- آزمایشگاهی در شهر توکیو است که یک صفحه پیل خورشیدی را تحت بازتابش بازتابنده مسطح با ۹۵ درصد توان بازتابش قرار می‌دهد به طوری که سطح و عمق بازتابنده به ترتیب ۲ و ۲/۷ برابر سطح و ارتفاع پیل انتخاب شد و زاویه آینه و پیل با خط افق به ترتیب ۲۵ و ۷۰ درجه در نظر گرفته شد؛ نتایج پژوهش، افزایش بازده الکتریکی ۵/۱ برابری سامانه ترکیبی را نسبت به بازده پیل بدون تلفیق با بازتابنده تأیید نموده است این در حالی است که مساحت پیل در سامانه ترکیبی نصف مساحت پیل بدون بازتابنده در نظر گرفته شده است (شکل ۱). این تحقیق همچنین ثابت نمود زمانی که زاویه پیل خورشیدی نسبت به افق بهینه نباشد استفاده از بازتابنده تخت راهکاری بسیار مناسب در افزایش توان الکتریکی پیل است. (Matsushima, T. Setaka, & Muroyama, 2003, pp. 610-612).

تحقیق میدانی دیگری در شهر قاهره در کشور مصر با استفاده از یک آینه تخت نور خورشید طوری بر روی سطح یک صفحه پیل خورشیدی موازی سطح افق بازتابنده شد که در طول ساعات آفتابی، یعنی

بر طبق آمار آژانس بین‌المللی انرژی، بخش ساختمان با سهمی معادل ۳۶ درصد از سرانه مصرف کل انرژی در جهان و نیز ۳۹ درصد از سرانه انتشار گاز دی‌اکسید کربن در سال ۲۰۱۷ میلادی بیشترین مقدار را در هر دو حوزه به خود اختصاص داده است. بعلاوه چشم‌انداز مصرف انرژی نیز رشد چشمگیر استفاده از انرژی الکتریکی در بخش ساختمان تا سال ۲۰۴۰ میلادی را نشان می‌دهد (BP-P.L.C, 2019, p. 37). در ایران نیز بخش ساختمان با مصرف ۱/۵۰ درصد از کل سرانه مصرف برق در کشور بزرگ‌ترین مصرف‌کننده در این حوزه به شمار می‌آید (DPEA, 2016, p. 6). از آنجاکه ۸۹ درصد از برق تولیدی در نیروگاه‌های ایران پایه استفاده منابع سوخت فسیلی است (IGMC, 2019, p. 4)، تولید الکتریسیته مورد نیاز ساختمان‌ها از منابع تجدید پذیر انرژی در محل استفاده از آن می‌تواند نقش مهمی در کاهش بار وارد بر نیروگاه‌ها و شبکه توزیع برق و انتشار گاز دی‌اکسید کربن ناشی از سوخت‌های فسیلی در کشور داشته باشد.

بدنه بنا به عنوان خارجی‌ترین بخش در تماس با محیط کنترل نشده بیرون ساختگاه مناسبی جهت جذب انرژی تابشی خورشید است (Hegger, Fuchs, Stark, & Zeumer, 2008, p. 82) به طوری که تولید الکتریسیته از طریق پوسته ساختمان‌های یکپارچه با پیل خورشیدی به عنوان پیشروترین بخش از صنعت خورشیدی در سراسر جهان معرفی شده است (Delisle & Kummert, 2014, p. 50)؛ ارزیابی ساختمان‌های یکپارچه با پیل خورشیدی در اروپا نشان می‌دهد که ۵۰ درصد از آن‌ها از نمای یکپارچه با پیل خورشیدی، ۳۰ درصد از بام‌های مولد الکتریسیته و مابقی از ترکیب دو سامانه استفاده کرده‌اند (Tabakovic, et al., 2017, p. 994)؛ دلیل استقبال بیشتر از نمای یکپارچه با پیل خورشیدی نسبت به بام آن است که نمای ساختمان سطحی گسترده را برای نصب پیل خورشیدی بدون نیاز به اشغال سطح زیربنای اضافی در مناطق پر تراکم شهری فراهم می‌آورد، باین‌وجود زاویه غیر بهینه تابش بر سطح نما، به خصوص در فصل تابستان، عامل اصلی در کاهش بازده نماهای مولد الکتریسیته است. (Soria, Gerritsen, Lefillaaster, & Broquin, 2016, p. 52) طرف دیگر، نیاز به طراحی گشایش در وجه جنوبی بنا موجب کاهش چشمگیر سطح قابل استفاده برای نصب پیل‌های خورشیدی خواهد شد. لذا یافتن راهکار طراحی که بتواند علاوه بر جبران کاهش شدت تابش در فصل تابستان، توانایی جبران کاهش سطح پوسته تحت پوشش به دلیل وجود گشایش‌ها را نیز داشته باشد مسئله اصلی پژوهش حاضر است.

با توجه به پیشینه پژوهش راهبرد مورد آزمون در این تحقیق بهره‌گیری از بازتابنده تخت در تلفیق

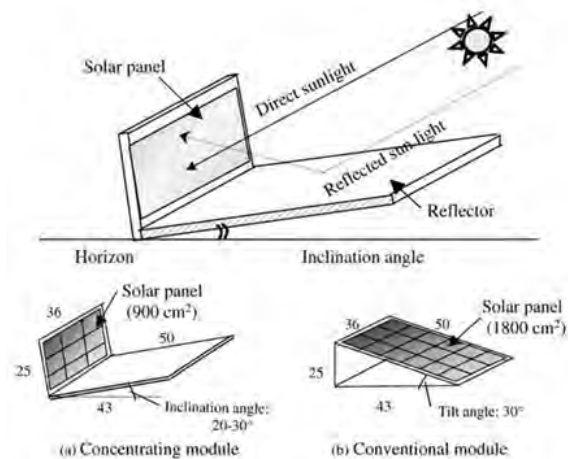


پیل خورشیدی تحت بازتابش ۲۵ درصد بیشتر از پیل بدون بازتابنده است. در این تحقیق زاویه مدول پیل خورشیدی با افق  $34/5$  درجه و جهت آن به سمت جنوب بوده است. ضمن اینکه استفاده از بازتابنده‌ها را در افزایش بازده بسیار اقتصادی‌تر از افزایش سطح پیل برای بالا بردن توان خروجی است (Bilal, Arbab, Zain, Afridi, & Khattak, 2017, p. 101).

در شهر بغداد در کشور عراق نیز تأثیر بازتابنده تخت بر بازده صفحه پیل خورشیدی طی یک برداشت میدانی بررسی و سپس با نرم‌افزار زی‌مکس<sup>۷</sup> نیز شبیه‌سازی شد. در این تحقیق بیشترین بازده برای یک پانل با زاویه بهینه تحت انعکاس بازتابنده تخت که از صفر تا  $90$  درجه تغییر زاویه داده شد، برابر با  $85$  درصد در ساعت  $11$  صبح با آینه‌ای که با سطح پیل زاویه  $60$  درجه می‌ساخت به دست آمد و بهترین میزان توان خروجی  $72/8$  وات در ساعت  $12$  ظهر برای روز  $12$  اردیبهشت‌ماه اندازه‌گیری گردید. نتیجه شبیه‌سازی‌ها نیز بیشترین بازده را  $59/59$  درصد عنوان نمود (Alhamadany, Ali, & Zain, 2016, pp. 21-23).

تحقیق میدانی دیگری در هندوستان تأثیر تشدید اشعه تابشی بر روی بازده صفحات پیل خورشیدی توسط چهار بازتابنده تخت را برای یک پیل خورشیدی با زاویه  $30$  درجه با افق بررسی کرده (شکل ۱) و تأثیر آن را بر روی شدت جریان خروجی، توان خروجی و بازده پیل در ساعات  $10$  صبح،  $12$  ظهر،  $2$  و  $4$  بعدازظهر به دست آورده است. نتایج آزمایش  $60-50$  درصد افزایش در جریان و توان خروجی از سامانه را نشان می‌دهد (Sathyanarayana, Ballal, kumar, & Laksmi sagar, 2014, p. 363). همچنین تحقیق تجربی دیگری که بر روی صفحه پیل خورشیدی تحت بازتابش آینه تخت طی روزهای آفتابی ماه آوریل در پاکستان انجام گرفت مشخص تلفیق بازتابنده تخت به پیل خورشیدی بدون استفاده از خنک‌کننده  $32$  درصد و با استفاده از خنک‌کننده لایه آب بر روی پیل تا  $52$  درصد موجب افزایش بازده خواهد شد (شکل ۲) (Arshad, Tariq, Niaz, & Jamil, 2014, p. 295).

استفاده از محاسبات عددی نیز جهت تحلیل عملکرد پیل خورشیدی تحت بازتابش بازتابنده تخت به‌کاربرده شده‌اند از جمله یکی از تحقیقات انجام‌شده با این شیوه نشان می‌دهد که بازتابنده تخت منظم بسیار مؤثرتر از نوع نامنظم آن در افزایش شدت تابش عمل می‌کند ضمن اینکه برای پیل خورشیدی افقی در ترکیب با بازتابنده به سمت جنوب جهت‌گیری شرقی-غربی بازتابنده بهترین نتیجه را در افزایش بازتابش دارد. این پژوهش همچنین تأکید می‌نماید در مواردی که جهت‌گیری پیل خورشیدی مناسب



**Fig.1. Position of PV panel relative to the flat mirror and the Sun (up). Comparison of slope angle and the area of the solar panel combined with reflector (down-left) with one without reflector (down-right) (Matsushima, T. Setaka, & Muroyama, 2003, pp. 604,610)**

$3$  ساعت قبل و بعد از  $12$  ظهر، همواره سطح صفحه پیل تحت بازتابش قرار گرفت. نتایج این پژوهش افزایش بازده سالانه  $22$  درصدی را برای سامانه ترکیبی نشان می‌دهد (Ahmad & Hussein, 2001, p. 1333). همچنین افزایش بازده  $25-20$  درصد توان خروجی سالانه مدول‌ها طی یک تحقیق میدانی در کشور سوئد با استفاده از بازتابنده تخت به‌شرط گرم نشدن بیش از حد پیل، ابعاد مناسب بازتابنده برای تأمین بازتابش کامل و نیز اتصال صحیح سلول‌های تشکیل‌دهنده پیل جهت تأمین حداقل مقاومت داخلی، تأیید گردید (Ronnelid, Karlsson, Krohn, & Wennerberg, 2000, p. 290).

در دانشگاه صنعتی چالمرز<sup>۶</sup> نیز نتایج یک تحقیق نشان داد که با الحاق دو بازتابنده تخت به طول یک و نیم متر در طرفین پیل خورشیدی افقی به عرض  $55$  سانتیمتر به‌طوری‌که سطح مجموع بازتابنده‌ها  $9$  برابر سطح پیل باشد و زاویه آن‌ها با پیل  $65$  درجه انتخاب شود توان خروجی تا  $74$  درصد بدون احتساب اثر افزایش دما و تا  $65$  درصد با در نظر گرفتن اثر افزایش دمای  $15$  درجه برای سطح پیل خورشیدی افزایش می‌یابد (Barman, 2011, p. 45). تحقیق تجربی دیگری در شهر جیزه مصر، بازده یک سامانه پیل خورشیدی تحت بازتابش با آینه تخت را در طول یک روز زمستانی  $12/6$  و  $11/02$  درصد با و بدون بازتابنده تخت اندازه‌گیری کرد. در این تحقیق زاویه صفحه پیل با افق  $30$  درجه و زاویه آینه  $7$  درجه با خط قائم در نظر گرفته شد و کل سامانه با استفاده از یک ردیاب خورشیدی در طول روز اشعه آفتاب را دنبال نمود. (Helmy, Khalifa, Oksha, & Elhaddad, 2014, p. 105).

همچنین در تحقیق تجربی دیگری در کشور پاکستان از قرار دادن یک صفحه پیل خورشیدی تحت انعکاس یک آینه تخت افقی نتیجه گرفته شد که میانگین افزایش برای جریان اتصال کوتاه

جنوب با جهت گیری نزدیک به امتداد قائم و بازتابنده تخت توان الکتریکی را تا ۵۰ درصد بالا می‌برد.

۲. بهترین بازده از سامانه ترکیبی زمانی حاصل می‌شود که تمام سطح پیل تحت پوشش بازتابش باشد و بازتابنده بر روی پیل سایه‌اندازی نداشته باشد.

۳. به‌منظور جلوگیری از بالا رفتن دمای پیل‌های خورشیدی تحت بازتابش استفاده از سامانه‌های خنک‌کننده از جمله تهویه طبیعی توصیه شده است؛ اگرچه بازتابنده تخت نسبت به تشدیدکننده‌های نوری افزایش دمای کمتری را در سطح پیل خورشیدی ایجاد می‌کند.

۴. بازتابنده تخت با افزایش شدت تابش موجب افزایش استفاده از مساحت مفید پیل خورشیدی می‌شود.

۵. زاویه بازتابنده و پیل نقش اصلی در میزان سطح پوشش بازتابش، شدت تابش رسیده به سطح پیل و تعیین میزان بازده سامانه تلفیقی دارد.

توجه به نتایج فوق نشان می‌دهد که بهره‌گیری از تلفیق بازتابنده تخت با پیل راهبردی مؤثر در افزایش توان خروجی از سامانه است. این قابلیت به‌خصوص در طراحی نماهای مولد الکتریسیته که به دلیل الزام وجود گشایش‌های شفاف، محدودیت سطح برای استفاده از پیل خورشیدی وجود داشته و همچنین به دلیل عدم تابش بهینه نور خورشید به‌ویژه در فصل تابستان بازده پایینی دارند، می‌تواند یک راهبرد عملی باشد.

### روش تحقیق

پژوهش حاضر به دنبال افزایش بازده پوسته جنوبی یکپارچه با پیل خورشیدی از طریق تبیین و طراحی الگوی بهینه تلفیق پیل با بازتابنده تخت بر روی نما است که از منظر هدف تحقیقی کاربردی است و ماهیتی کمی دارد. روش انجام تحقیق توصیفی-تجربی است به‌طوری‌که از منابع مکتوب به‌عنوان زیربنای مطالعات و تأمین‌کننده اطلاعات لازم جهت انجام مطالعات میدانی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای استفاده شده است.

ابزارهای مورد استفاده در روند پژوهش، ترسیمات هندسی در تحلیل تابش و بازتابش خورشیدی بر سطح نما، ماکت‌های مطالعاتی در تحلیل اثر تابشی بازتابنده تخت بر نما در فرایند تحقیق میدانی و نیز افزونه شبیه‌ساز گرس‌هاپر<sup>۸</sup> در محیط نرم‌افزار راینو<sup>۹</sup> به‌عنوان یک ابزار پارامتریک برای ساخت پوسته تلفیقی پیشنهادی و شبیه‌سازی تابش و بازتابش بر روی آن است، همچنین از افزونه لیدی باگ<sup>۱۰</sup> نیز جهت استخراج اطلاعات تابشی از فایل اطلاعات اقلیمی تولیدشده توسط نرم‌افزار متئونورم<sup>۱۱</sup> استفاده شده که خلاصه‌ای از آن در جدول (۱) آورده شده است.

بستر انجام پژوهش نیز ساختمان‌های میان مرتبه مسکونی در شهر همدان انتخاب شده است.

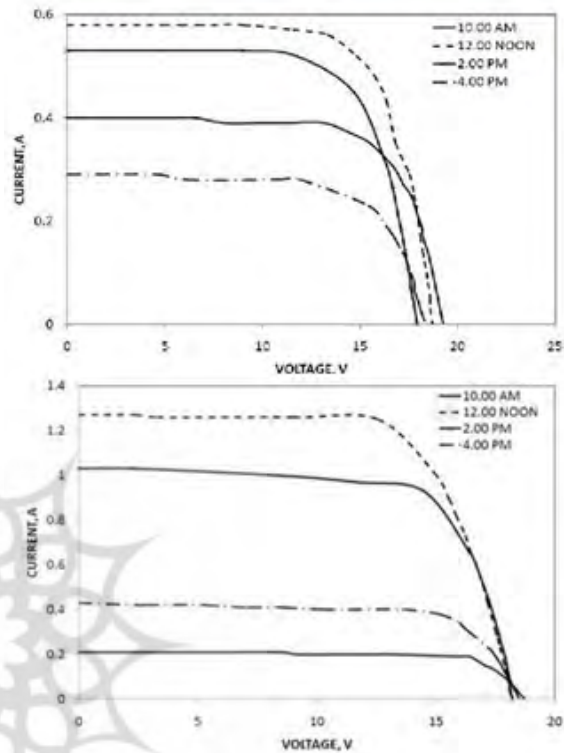


Fig.2. Combination of flat reflectors and the PV panel (up), Voltage-Current characteristic without using reflectors (middle) and applying 4 flat mirrors (down). (Sathyanarayana, Ballal, kumar, & Laksmi sagar, 2014, pp. 358,360)

نیست استفاده از بازتابنده‌ها بسیار کارآمد خواهد بود. همچنین نشان می‌دهد که بازده سامانه تابعی از زاویه بازتابنده با پیل خورشیدی است به‌طوری‌که در انقلاب زمستانی که خورشید حداقل ارتفاع را دارد و در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه بیشترین توان خروجی زمانی است که زاویه بازتابنده با سطح گردآور ۷۷ درجه باشد که در این حالت افزایش توان الکتریکی سامانه ترکیبی ۴۰ درصد بیشتر از گردآور بدون بازتابنده است. زاویه بهینه بازتابنده با سطح گردآور برای اعتدال بهاری حدود ۹۵ درجه است که میزان افزایش بازده حدود ۴۵ درصد اندازه‌گیری شد (Seitel, 1975, pp. 291-295). از بررسی منابع و تحقیقات انجام‌شده درباره افزایش شدت تابش با استفاده از بازتابنده تخت نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱. در صورتی که سطح پیل خورشیدی عمود بر جهت تابش باشد استفاده از بازتابنده تخت توان خروجی را تا ۷۴ درصد افزایش می‌دهد و ترکیب یک پیل رو به

Table 1. Insolation properties during the equinoxes and solstices in Hamedan City (Latitude: 34.77°, Altitude: 48.51°)

Time	21 September			21 June			21 December		
	Perpendicular Power Density (w/m <sup>2</sup> )	Solar Position		Perpendicular Power Density (w/m <sup>2</sup> )	Solar Position		Perpendicular Power Density (w/m <sup>2</sup> )	Solar Position	
		Zenith Angle (°)	Azimuth Angle (°)		Zenith Angle (°)	Azimuth Angle (°)		Zenith Angle (°)	Azimuth Angle (°)
9	960.3	52.87	120.74	995.8	40.96	93.51	780.80	71.94	137.37
10	1012.1	43.21	136.27	1030.5	28.81	104.93	890.60	64.62	149.92
11	1037	36.42	157.30	1048.1	17.62	125.91	943.5	59.83	164.51
12	1043.2	34.31	183.12	1053.7	11.34	177.66	958.7	58.21	180.45
13	1032.9	37.69	208.14	1048.8	16.96	231.93	941.7	60.02	196.35
14	1002.6	45.33	227.75	1032.2	28.02	254.09	889.50	64.97	210.83
15	941.9	55.45	242.20	998.8	40.14	266.86	767.40	72.40	223.26

به بازه حرکت تصویر قائم نور خورشید بر سطح نمای جنوبی ایده اولیه تلفیق شکل گرفت و نهایتاً پوسته تلفیقی پیشنهادی به منظور انجام بهینه‌سازی مشخص شد.

نتایج بررسی منابع نشان داد که سه عامل اصلی مؤثر بر بازده و توان الکتریکی پیل خورشیدی عبارت از: سطح تابش، شدت تابش و سایه‌اندازی بر سطح پیل هستند، لذا یافتن ایده‌ای برای تلفیق بازتابنده تخت و پیل خورشیدی در نمای جنوبی به نحوی که بتواند هر سه عامل اصلی را هم‌زمان تأمین نماید هدف اصلی در مرحله امکان‌سنجی تحقیق است. در همین راستا تحلیل سایه‌اندازی بازتابنده تخت بر سطح نما در شکل (۴) نشان داد که استفاده از بازتابنده تخت به صورت عمودی در سطح نما موجب ایجاد سایه بر روی پیل خورشیدی در قبل یا بعد از ظهر خواهد شد در حالی که بازتابنده تخت افقی و نیز بازتابنده مورب با شیبی معادل بازه حرکتی تصویر قائم نور خورشید بر سطح قائم در فصول مختلف، بر فضای محصور بین دو بازتابنده طرفینی سایه‌ای ایجاد نخواهد کرد. بنابراین از منظر سایه‌اندازی بازتابنده تخت افقی و مورب نسبت به بازتابنده عمودی در اولویت ایده‌پردازی قرار دارد.

برای مقایسه بازتابنده افقی و بازتابنده مورب از نظر سطح پوشش بازتابش یک مطالعه میدانی در روز ۲۳ ژوئن انجام شد؛ در این آزمایش یک سطح قائم

شکل (۳) محدوده مجاز جهت بررسی مدول پایه تحقیق را در حفاصل بین نور گذر شفاف دو طبقه با جزئیات ابعادی حاکم بران براساس حداقل ارتفاع استاندارد فضا (۲،۷۰ متر)، ارتفاع کف پنجره (۱،۱۰ متر) و ضخامت سقف (۰،۴ متر) نشان می‌دهد.

میزان پیش آمدی پوسته در بالای گشایش‌ها ( $D_1$ ) با توجه فرمول محاسبه سایه‌بان ( $D_1 = H/Z$ ) حداکثر ۳۹ سانتی‌متر لحاظ شده است در فرمول،  $H$  ارتفاع پنجره و عامل  $Z$  برابر با  $3/6$  در نظر گرفته شده است.<sup>۱۱</sup> حداقل فاصله پوسته تا جداره نما در بالای مدول به عنوان مجرای خروج هوا ( $D_2$ ) به منظور امکان تأمین تهویه طبیعی حداقل ۰.۱ متر در نظر گرفته شد.<sup>۱۳</sup> پس از تعیین محدودیت‌های ابعادی حاکم بر هندسه پوسته، تحقیق در سه مرحله امکان‌سنجی، بهینه‌سازی و ارزیابی به شرح زیر انجام شد:

#### امکان‌سنجی تلفیق پوسته با بازتابنده تخت در نما

در این مرحله با بهره‌گیری از تحلیل هندسه تابش خورشیدی بر سطح نما و ترسیم بازتابش اشعه تابشی از سطح بازتابنده تخت و همچنین انجام مطالعات میدانی و ساخت مدل واقعی از حالات مختلف ترکیب بازتابنده تخت با پوسته پیل خورشیدی در نما و تحلیل عملکرد آن‌ها در برابر اشعه تابشی به انتخاب بهترین مدل ترکیب پرداخته شد. سپس با توجه

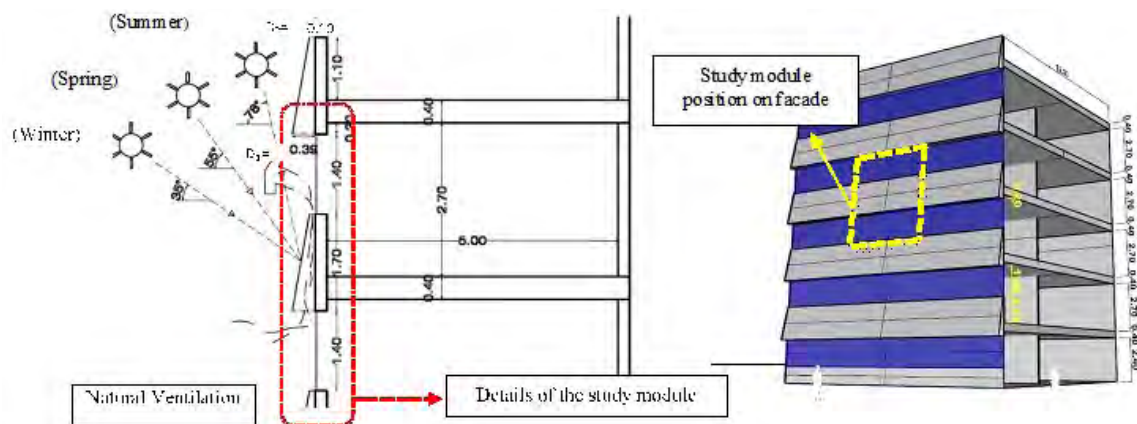


Fig.3. General view of the study model (up), Details of dimensional restrictions governed on the case study (down)

## شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پوسته پیشنهادی

پوسته پیشنهادی تحقیق ضمن استفاده از بازتابنده‌های مورب برای ایجاد بازتابش با آزاد کردن شکل و زاویه ترکیب بازتابنده و پیل خورشیدی در سطح پوسته امکان بررسی پارامتریک فرم آن را ایجاد کرده است بنابراین در مرحله دوم، تحقیق به دنبال یافتن مقادیر بهینه مؤلفه‌های سازنده هندسه مولد فرم پوسته خورشیدی تلفیقی پیشنهادی باهدف بیشترین جذب تابش خورشیدی از طریق انعکاس است. با توجه به شکل (۸) مؤلفه‌های سازنده هندسه پوسته موردنظر که در واقع متغیرهای مستقل پژوهش می‌باشند عبارت‌اند از:

(الف) تعداد تقسیمات پوسته پیشنهادی در امتداد محورهای افقی و قائم<sup>۱۵</sup>، (ب) زاویه بازتابنده‌های تخت در زیر مدول‌ها در امتداد طولی و عرضی<sup>۱۶</sup>، (ج) زاویه بازتابنده‌های تخت کنار مدول‌ها در امتداد طولی و عرضی<sup>۱۷</sup>، (د) زاویه صفحات خورشیدی بیرونی با امتداد افقی<sup>۱۸</sup> و (ز) عمق افقی بازتابنده‌ها<sup>۱۹</sup>. از طرف دیگر سه متغیر وابسته تحقیق جهت بهینه‌سازی نیز عبارت از نسبت مساحت بازتابش بر روی پیل‌ها به کل سطح آن‌ها<sup>۲۰</sup>، مقدار افزایش شدت تابش رسیده به پیل‌های خورشیدی<sup>۲۱</sup> و مساحت سایه ایجادشده بر روی سطح نما<sup>۲۲</sup> است که در ادامه روند شبیه‌سازی پوسته و بهینه‌سازی آن به تفکیک آورده شده است (جدول ۲).

## شبیه‌سازی پوسته

به‌منظور شبیه‌سازی پوسته خورشیدی با استفاده از افزونه گرس‌هایپر، الگوریتم سازنده حجم بر پایه مؤلفه‌های سازنده هندسه پوسته، به‌عنوان پارامترهای ورودی، نوشته شد. خروجی الگوریتم پوسته‌ای است که هندسه آن مطابق با تغییر مقدار هر مؤلفه ورودی تغییر می‌کند (شکل ۸ و ۹).

برای شبیه‌سازی انعکاس بازتابنده‌ها با محاسبه زوایای لحظه‌ای خورشید توسط افزونه لیدی‌باگ، بازتابش ایجادشده بر روی سطوح پیل‌ها به‌صورت پارامتریک در محیط گرس‌هایپر شبیه‌سازی شده و مساحت بازتابش محاسبه گردید، همچنین مجموع شدت تابش و بازتابش رسیده به هر سطح به‌عنوان شدت تابش کل در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که ضرایب اصلی لحاظ شده در محاسبات در ادامه آورده شده‌اند:

(أ) **ضریب افت کسینوس**: که ناشی از زاویه بین اشعه رسیده به سطح پیل خورشیدی و بردار نرمال آن سطح ( $\alpha$ ) است و اثر آن در شدت انرژی تابشی رسیده به سطح ( $E$ ) براساس فرمول (۱)، محاسبه می‌گردد:

$$E = E_p * \cos \alpha \quad (1)$$

$E_p$ : شدت انرژی تابشی عمود بر سطح پیل خورشیدی

(ب) **ضریب بازتابش**: عددی است بین ۰ تا ۱ که

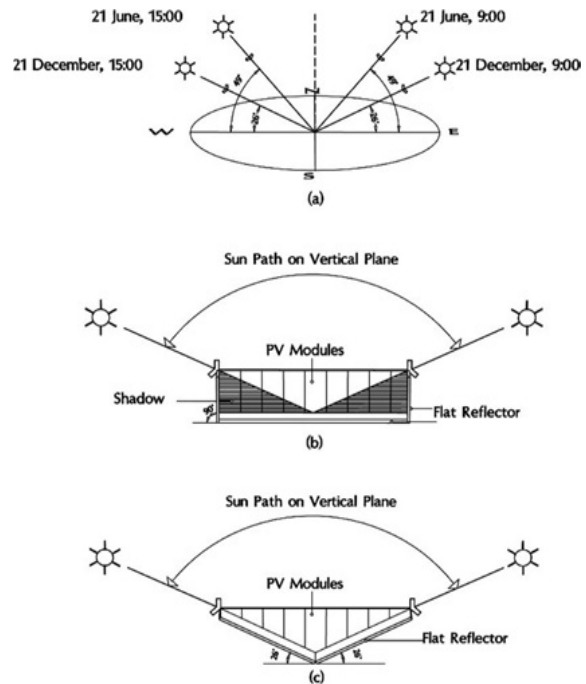


Fig.4. Comparison of sloped reflectors (c) with the vertical and horizontal ones (b) from the point of shadow casting view considering vertical projection of sun light through a day (a).

به عرض ۱۵ سانتیمتر تحت بازتابش آینه معمولی مستطیل شکل به عمق ۱۰ سانتیمتر طی ساعات ۹ صبح تا ۱۲ ظهر قرار گرفت و هم‌زمان همین سطح تحت بازتابش دو آینه تخت مورب با زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه به همان عمق قرار داده شد. در هر سه حالت سطح آینه بر سطح تحت بازتابش عمود است و ضمناً به‌منظور مقایسه صحیح، ارتفاع سطح مابین بازتابنده‌های مورب بر روی تصاویر در هر سه حالت علامت‌گذاری شده است. نتایج در شکل (۵) آورده شده است. مقایسه سطح بازتابش در سه حالت فوق نشان می‌دهد که سطح مابین دو بازتابنده تخت مورب با زاویه ۴۵ درجه با افق در تمام طول ساعات آزمون، تحت پوشش بازتابش قرار دارد اما معادل همین سطح برای بازتابنده تخت صرفاً در ساعت ۱۲ ظهر تحت بازتابش کامل خواهد بود بعلاوه بازتابنده‌های مورب بیش از یک‌بار سطح محصور مابین خود را تحت بازتابش قرار می‌دهند که در عکس گرفته‌شده از بازتابش حاصل از آینه‌های با زاویه ۳۰ درجه در ساعت ۱۲ ظهر به‌وضوح قابل‌درک است.

به‌منظور تکمیل روند امکان‌سنجی و به کمک هندسه ترسیمی شکل آینه‌های مورب به فرم مثلی تغییر داده شد (شکل ۶). نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آینه‌های مثلی که قاعده آن‌ها در محل اتصال دو آینه قرار دارد تا ۸۰ درصد فضای محصور بین دو آینه را تحت بازتابش قرار می‌دهد، از همین رو فرم حاصل به‌عنوان کانسپت<sup>۱۴</sup> شکل‌دهنده به فرم پوسته پیشنهادی انتخاب شد (شکل ۶-چپ). در شکل (۷) حالات مختلف ترکیب بازتابنده تخت با پیل خورشیدی و نیز پوسته پیشنهادی برای آزمون فرضیه نشان داده‌شده است.





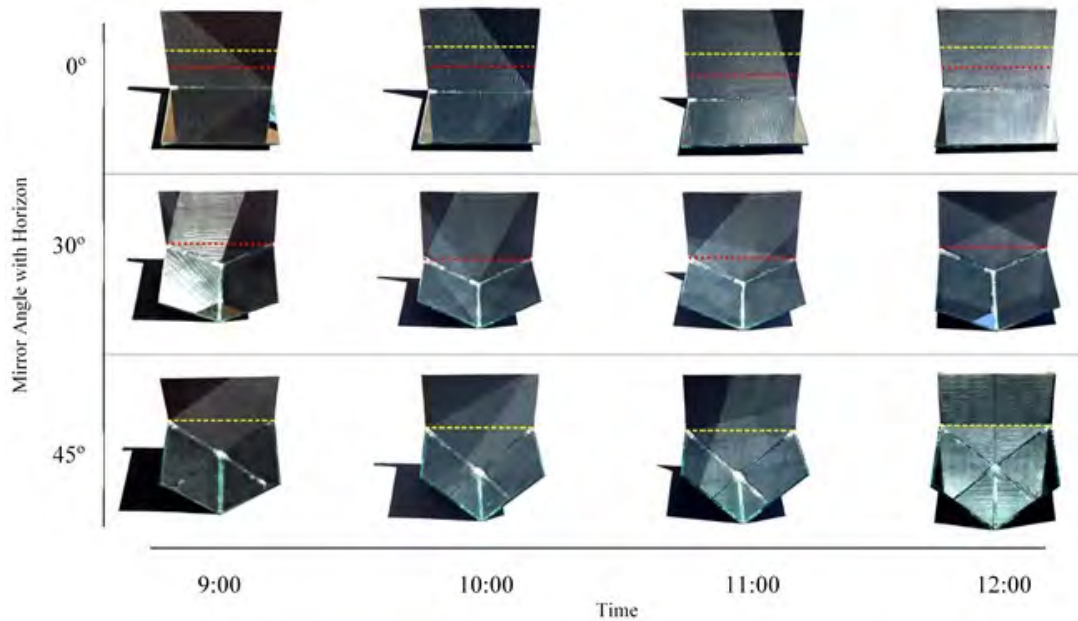


Fig.5. Reflection of a flat mirror on a given vertical plate while the angle of reflector varies from 0°-45° on June 22, from 9:00 to 12:00. The red and yellow lines show the equivalent level of enclosed space between 30° and 45°-sloped mirrors respectively

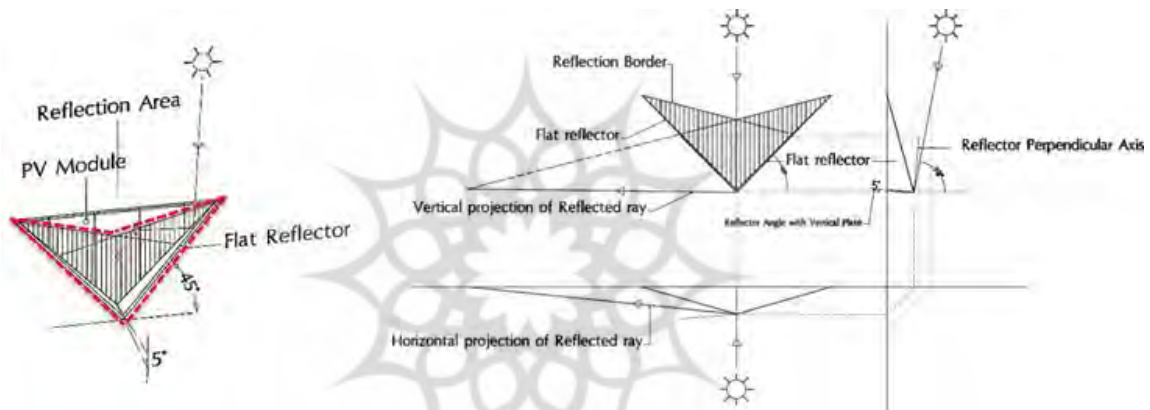


Fig.6. Using of triangle flat reflector for casting reflection as a combination concept (left) and drawing the reflection of a two 45°-sloped flat reflector with the lateral angle of 5° under the sun radiation on June 22, at noon (right).

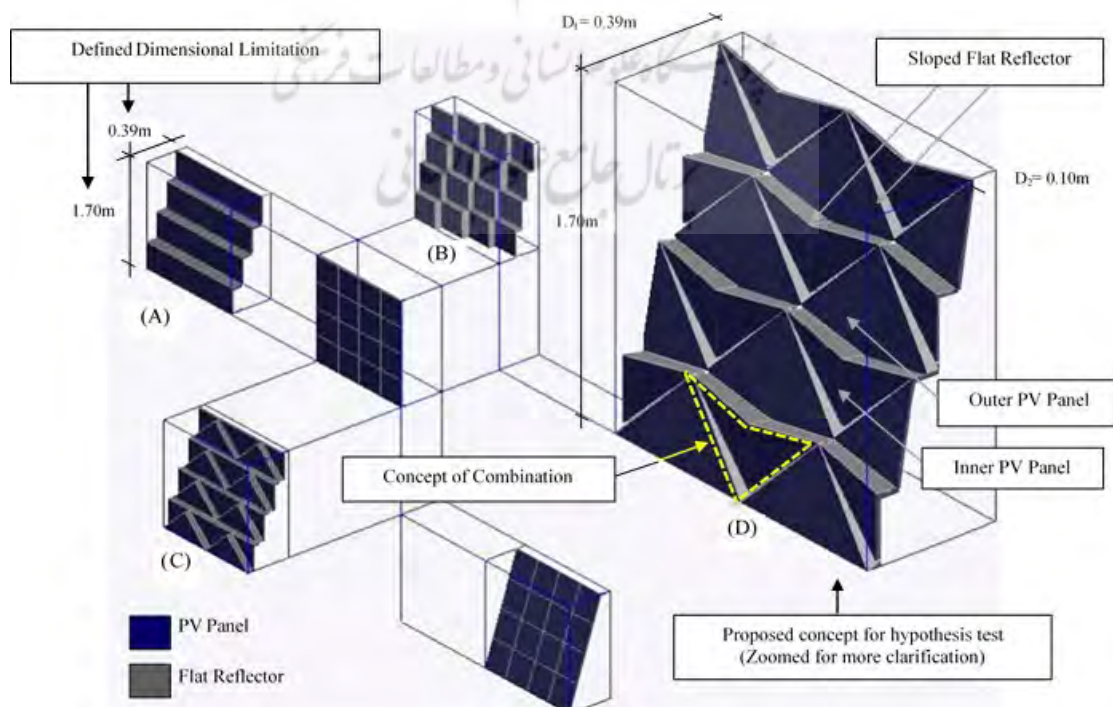


Fig.7. Various alternations of combining flat reflectors and PV panels in difined dimentional limitations: (a) Just using horizontal mirrors, (b) Using horizontal and vertical mirrors, (c) Using horizontal and sloped mirrors and (d) Just using sloped mirrors.(Concept of combining reflectors and PVs, which shapes the form of the proposed envelope, has been shown)

Table 2. Definition of independent and dependent variables of the research

Dependent Variables (Objective Functions in Optimization)	Independent Variables (Envelope geometry and Reflection Generating Parameters)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Area of Reflection / Total Panels Area- First dependent variable</li> <li>Increase in Reflection Intensity- Second dependent variable</li> <li>Area of Shadow Casting May created by Envelope Component on each other -Third dependent variable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lateral Angle of Side Mirrors -LAoSM</li> <li>Lateral Angle of Underneath Mirrors- LAoUM</li> <li>Number of Panels in Vertical Directions- NoP-V</li> <li>Horizontal Depth of Side Mirrors- HDoSM</li> <li>Side Mirrors Slope Angle- SMSA</li> <li>Underneath Mirrors Slope Angle- UMSA</li> </ul>

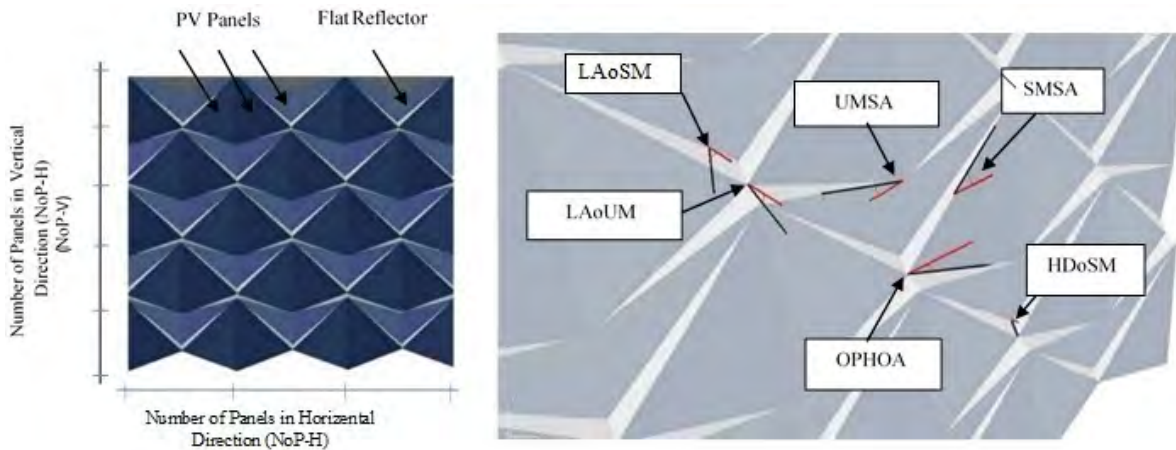


Fig.8. Definition of generating parameters which make the case study as a combination of flat reflectors and PV panels

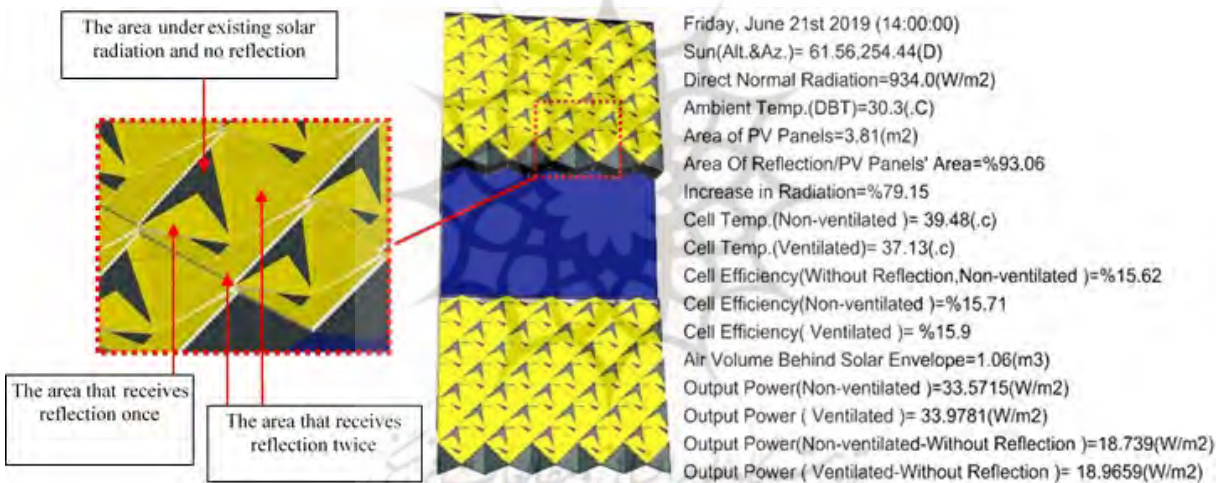


Fig.9. An output sample of the written algorithm in Grasshopper which creates the proposed envelope and shows reflection on it as well as the required information needed for the optimization process. A part of the envelope is zoomed to present on the ability of algorithm in casting and calculating reflections on PV panels

دمای محیط براساس ساعت و روز در سال با کمک فایل آب و هوایی حاصل از نرم‌افزار متئونورم و افزونه لیدی‌باگ در محیط نرم‌افزار گرس‌هاپر به دست می‌آید، مقدار ضریب برای صفحات پیل خورشیدی دارای تهویه ۳۲ و بدون تهویه ۴۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده و مقدار معادل ۱۰۰۰ وات بر مترمربع لحاظ گردیده است (PVSol, 2015).

برای محاسبه تأثیر افزایش دما بر توان الکتریکی خروجی از سامانه، فرمول (۳) برای الگوریتم تعریف شده است (DGS, 2013, p. 63):

$$\Delta\eta_T \approx -0.045 \times (25^\circ\text{C} - T_{cell}) \times \eta_n \quad (3)$$

$\eta_n$ : بازده نامی سلول

$T_{cell}$ : دمای سلول خورشیدی

$\Delta\eta_T$ : نوسانات بازده پیل خورشیدی بر اثر حرارت

نشان‌دهنده کیفیت بازتابندگی سطح است که مقدار آن در این پژوهش برای تمام بازتابنده‌ها برابر با یک در نظر گرفته شده است.

ج) ضریب بازتاب مضاعف: مربوط به سطوحی است که بیش از یک بار تحت انعکاس قرار می‌گیرند؛ درواقع بیانگر میزان افزایش شدت تابش در هر بار جذب بازتابش است که به کیفیت بازتابش و خصوصیات فیزیکی سطح بستگی دارد. در تحقیق این ضریب در حالت ایده‌آل و برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. با استفاده از فرمول (۲) دمای سطح صفحات پیل خورشیدی در دو حالت با و بدون تهویه توسط الگوریتم محاسبه می‌گردد:

$$T_{cell} = T_a + k \cdot \frac{E}{E_{STC}} \quad (2)$$

$T_a$ : دمای محیط و ضریب وابسته به میزان تهویه اطراف سلول

در گام اول، برای هر کدام از چهار ساعت<sup>۲۶</sup> واقع در بازه زمانی ۹ صبح تا ۱۲ ظهر در هر فصل<sup>۲۷</sup> باهدف دستیابی به بیشترین نسبت سطح تحت پوشش انعکاس، بیشترین مقدار افزایش شدت تابش در اثر انعکاس و کمترین مساحت سایه‌اندازی احتمالی اجزا پوسته بر یکدیگر بهینه‌سازی انجام شده و سپس پاسخ‌هایی که مساحت سایه در آن‌ها صفر بود در محیط اکسل وارد نمودار شدند (شکل ۱۰-۱۰-چپ)، نزدیک‌ترین پاسخ به شاخص ایده‌آل<sup>۲۸</sup> (نقطه سیاه‌رنگ در نمودار) با توجه به فرمول (۴) به‌عنوان بهترین پاسخ برای هر ساعت انتخاب گردید.

$$D = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (4)$$

$D$ : فاصله پاسخ موردنظر تا شاخص ایده‌آل

$X$  و  $Y$ : فاصله افقی و عمودی آن تا شاخص

در گام دوم، با تنظیم مؤلفه‌های ورودی الگوریتم براساس مقادیر ورودی هر کدام از ساعات بهینه در هر روز که در گام اول مشخص شده بودند، مقادیر متغیرهای وابسته برای مابقی ساعات روز محاسبه گردید، به عبارتی با همان تنظیمات بهینه مشخص شده برای هر ساعت صرفاً مقادیر خروجی برای ساعات دیگر روز محاسبه شده و نمودارهای متناظر مقادیر متغیرهای وابسته برای هر ساعت در هر فصل ترسیم شد که هدف از این کار یافتن بهترین تنظیمات هندسه پوسته برای کل روز شاخص در هر فصل با استفاده از تحلیل روند افزایش و کاهش متغیرهای وابسته پژوهش برای روز شاخص هر فصل بود.

نمونه‌ای از خروجی الگوریتم در شکل (۹) نشان داده شده است که شامل نمایش فرم و اطلاعات ساختاری پوسته براساس مقادیر تعریف شده برای مؤلفه‌های ورودی در جدول (۲)، نمایش بازتابش تولید شده با توجه به هندسه بازتابنده‌ها، دمای سطح صفحات پیل خورشیدی در دو حالت با و بدون تهویه طبیعی می‌شود.

همچنین سه خروجی اصلی تحقیق یعنی نسبت مساحت تحت پوشش انعکاس بر مساحت کل صفحات، درصد افزایش تابش رسیده به سطح، و مساحت سایه‌اندازی بازتابنده بر روی پیل‌ها توسط الگوریتم محاسبه و نمایش داده می‌شود و نهایتاً بازده سامانه در سه حالت: بدون بازتابش و تهویه، تحت بازتابش و بدون تهویه و نیز با تهویه و بازتابش محاسبه و همراه با توان الکتریکی خروجی از سامانه نمایش داده شده است.

### بهینه‌سازی هندسه

با توجه به تعداد متغیرهای مستقل و وابسته تحقیق (جدول ۳) افزونه اختاپوس<sup>۲۳</sup> برای بهینه‌سازی متغیرها مورد استفاده قرار گرفت این افزونه با استفاده از الگوریتم ژنتیک<sup>۲۴</sup> نسبت به تغییر مقادیر مؤلفه‌های ورودی (متغیرهای مستقل) برای دستیابی هم‌زمان به مطلوب‌ترین مقدار برای چند تابع هدف (متغیرهای وابسته) عمل می‌کند به طوری که هر محور نشان‌دهنده یک تابع هدف است؛ هر چه پاسخ تولید شده<sup>۲۵</sup> به محورها نزدیک‌تر باشد بهینه‌تر است (شکل ۱۰-راست).

Table 3. Governing values of the proposed envelope simulated in Grasshopper plug-in

Site Information	Hamadan City (Latitude: 34.77°, Altitude: 48.51°; Above Mean Sea Level: 1749 m)									
Time of Simulation	June 21 <sup>st</sup> at 14:00 O'clock									
Envelope Parameters	LAoSM	LAoUM	SMSA	UMSA	NOP(H;V)	HDoSM	OPHOA	HoCS*	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
Values	-2°	2°	41°	20°	5;8	0.02m	1°	1.70m	0.39m	0.1m

\*Hight of Compound Surface

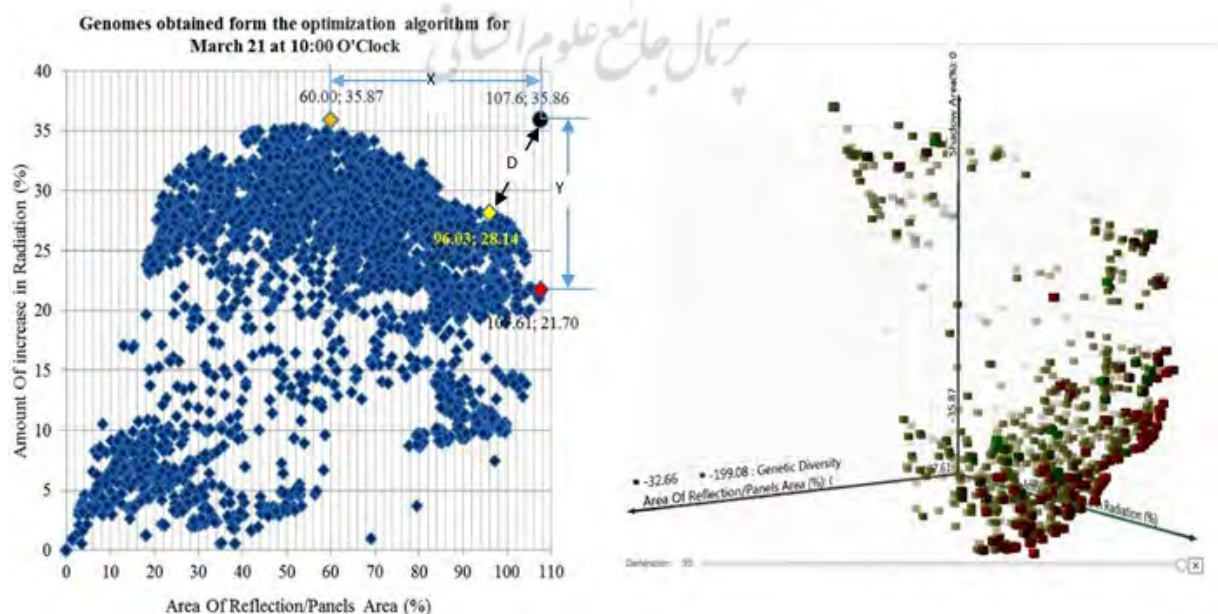


Fig.10. Method of finding the best genome for a given time among the answers with no shading (left), and output of the Octopus optimizer for 21<sup>st</sup> of March at 10:00; the darker cube the more optimized genome (right).

بهینه الگوریتم مربوط به هر ساعت، مقادیر مساحت بازتابش، افزایش تابش و توان خروجی برای ساعات دیگر در (روز شاخص) هر فصل محاسبه گردید که نتایج آن در نمودارهای شکل (۱۲) آورده شده است؛ هدف این مرحله یافتن بهترین پاسخ برای یک فصل از بین پاسخ‌های بهینه ساعات (روز شاخص) همان فصل است. بررسی نمودارها نشان می‌دهد که در فصل تابستان تنظیم الگوریتم بر طبق مقادیر بهینه ساعت ۱۱ صبح از نظر سطح پوشش بازتابش نسبت به تنظیمات براساس مقادیر بهینه ساعت ۱۲ ظهر شرایط بهتری را دارد از طرف دیگر روند تغییرات سطح و شدت تابش برای تنظیمات براساس مقادیر بهینه ساعت ۹ و ۱۰ صبح در هر دو نمودار کاهش یافته است.

در فصل بهار نتایج تنظیمات براساس مقادیر بهینه مؤلفه‌ها در ساعات ۹ و ۱۰ نشان از روند کاهش نمودار سطح تابش در طول روز دارد که نقطه ضعف این دو حالت است. از طرف دیگر بررسی نمودار شدت تابش در این فصل نشان می‌دهد که درصد افزایش شدت تابش برای تنظیمات براساس مقادیر

در گام سوم مقایسه بین فصول انجام شد به این صورت که تنظیمات بهینه روز شاخص هر فصل برای تمام ساعات دو فصل دیگر اعمال شده و میانگین توان خروجی هر فصل در سه حالت مختلف محاسبه و در نهایت بهترین تنظیمات الگوریتم برای کل سال انتخاب شده و عنوان مدل بهینه معرفی گردیده است.

### یافته‌های تحقیق

پس از شبیه‌سازی و سپس بهینه‌سازی برای هر ساعت از هر فصل، حدود ۱۰۰۰۰ پاسخ مختلف تولید شد و براساس فایل اکسل مربوط به هر ساعت از بین پاسخ‌هایی که مساحت سایه‌اندازی در آن‌ها صفر بود برای هر ساعت بهترین پاسخ از روی نمودار استخراج گردید که در شکل (۱۱) دو نمونه از ۱۲ نمودار تولید شده نشان داده شده و نهایتاً در جدول (۴) تنظیمات مؤلفه‌های ورودی و خروجی‌های الگوریتم برای پاسخ‌های بهینه به تفکیک ساعت و فصل آورده شده است.

در مرحله بعد با ثابت نگه‌داشتن تنظیمات

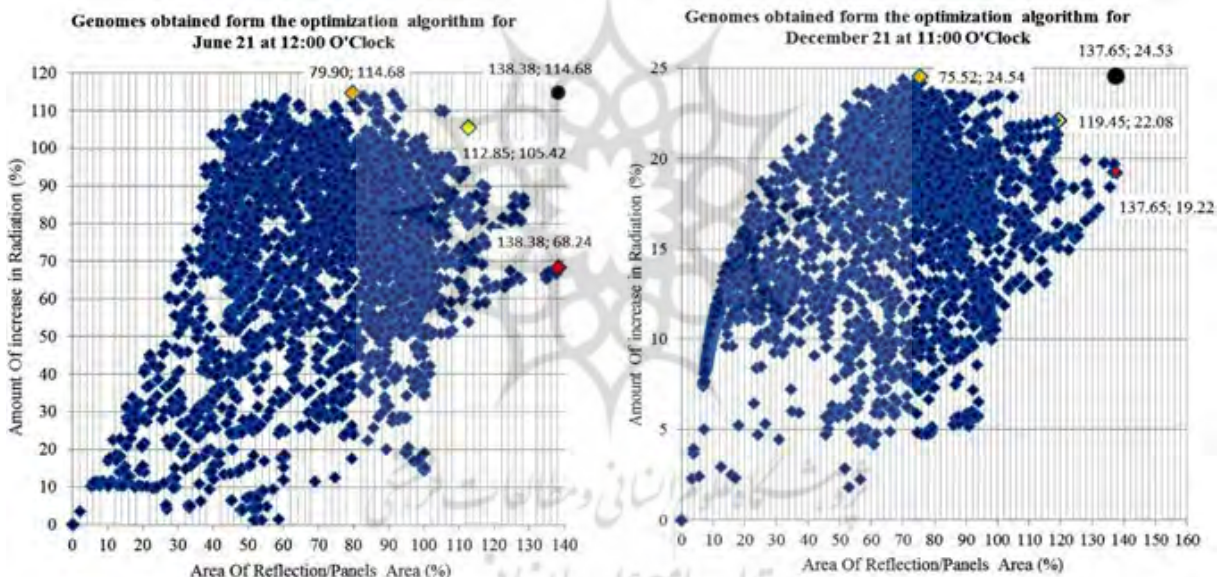


Fig.11. The optimum answers (yellow ones) for June 21 at noon (left) and December 21 at 11:00 (right); (The orange and green cube represent the best answers for the percentage of increase in radiation and area of reflection respectively)

Table 4. The Optimum Amounts of Proposed Geometry Parameters for each of the given hours in 4 seasons

Season	Time	Compound Envelope Parameters					Increase in Radiation (%)	Area of Reflection/Panels Area (%)	Output Power without Reflectors (W/m <sup>2</sup> )	Output Power Applying Reflectors (W/m <sup>2</sup> )	
		LAoSM	LAoUM	NoP-V	HDoSM (m)	SMSA					UMSA
Summer	9	-2°	0°	3	0.09m	44°	0°	234.83	108.01	6.47	21.85
	10	-2°	2°	10	0.02m	32°	24°	107.04	106.32	18.91	39.67
	11	2°	2°	3	0.06m	32°	22°	97.36	122.71	26.1	52.44
	12	2°	2°	3	0.04m	42°	24°	105.42	112.84	28.42	59.61
Spring/ Fall	9	8°	16°	3	0.09m	44°	0°	25.49	110.32	61.64	79.44
	10	14°	10°	4	0.01m	50°	4°	28.13	96.02	74.36	98.66
	11	14°	16°	3	0.09m	38°	24°	31.13	134.35	81.37	111.17
Winter	12	16°	16°	3	0.07m	32°	22°	32.26	147.5	82.87	114.44
	9	-4°	28°	8	0.00m	30°	0°	16.5	84.09	110.17	133.19
	10	22°	30°	4	0.07m	46°	0°	18.48	112.8	126.62	157.08
	11	24°	28°	3	0.09m	40°	24°	22.08	119.44	133.98	172.39
	12	28°	28°	3	0.07m	36°	24°	22.94	139.06	134.77	174.92

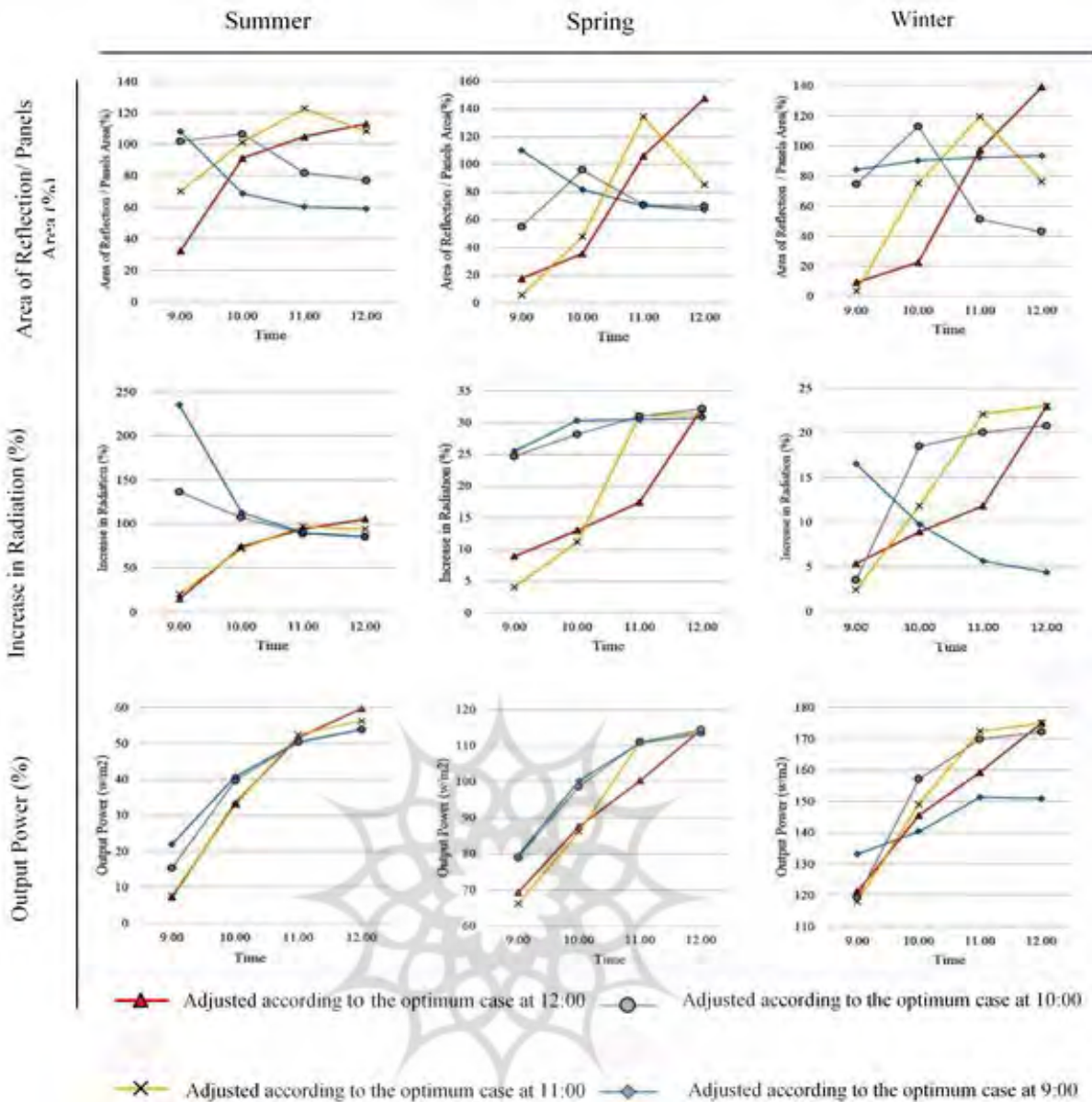


Fig.12. Amounts of Area of reflection, Increase in radiation, and Output power of the proposed geometry during hours of the index day of each season according to the optimum parameters of each hour

در نهایت به منظور تعیین بهترین تنظیمات الگوریتم برای کل سال، با ثابت نگه داشتن مؤلفه‌های ورودی بهترین تنظیم هر فصل، اطلاعات تابشی و ساعات دو فصل دیگر به الگوریتم وارد شد و نتایج خروجی اندازه‌گیری گردید که نتایج عددی مربوط به تنظیمات بهینه در فصل تابستان (۲۱ ژوئن- اول تیر) برای دو فصل دیگر در جدول (۵) به تفکیک ساعت برای ماه‌های شاخص سال آورده شده است، مشابه همین جدول برای ساعات شاخص در روز ۲۱ ام دیگرمه‌های سال نیز تهیه و میانگین مقادیر آن روز به عنوان نماینده هر ماه تعیین گردید که نتایج آن در جدول (۶) آورده شده است.

همین روند برای ساعات بهینه دو فصل بهار و زمستان نیز انجام شد که شکل (۱۳) نتایج هر سه فصل را در قالب نمودار نشان داده است. مطابق با شکل (۱۳) و نیز جدول شماره ۶، تنظیم سالانه مؤلفه‌های ورودی سامانه تلفیقی براساس مقادیر بهینه ساعت ۱۱ صبح تابستان، شدت تابش رسیده به سطح پوسته را تا ۷۱/۴۱

بهینه ساعت ۱۱ صبح نسبت به همین شاخص برای ساعت ۱۲ ظهر بسیار بالاتر است که تأثیر آن در نمودار توان خروجی هم دیده می‌شود.

در فصل زمستان تنظیمات براساس مقادیر بهینه ساعت ۹ صبح نشان از افزایش اندک سطح پوشش برای ساعات نزدیک به نیمروز دارد اما شدت تابش نزدیک به ساعت ۱۲ کاهش می‌یابد که مطلوب نیست از طرف دیگر روند نمودار سطح تابش برای تنظیمات نمودار برحسب مقادیر بهینه ساعت صبح ۱۰ کاهش است در صورتی که نمودار تنظیمات براساس ساعت ۱۱ در هر دو شاخص افزایشی بوده و حتی افزایش شدت تابش نسبت به تنظیمات براساس ساعت ۱۲ بسیار بیشتر است به طوری که نمودار توان خروجی برای نمودار تنظیمات براساس ساعت ۱۱ در فصل زمستان نیز شرایط بهتری را از دیگر نمودارها دارد. بنابراین تنظیمات مؤلفه‌های ورودی الگوریتم براساس مقادیر بهینه ساعت ۱۱ در هر سه فصل بهترین بازده را از نظر سطح پوشش بازتابش، شدت تابش و توان خروجی خواهد داشت.

Table 5. Yearly Outputs of Proposed Geometry when it's adjusted according to the optimized parameters for the 21st of June at 11:00 O'clock

Season	Time	Increase in Radiation (%)	Reflection Area/ Panels Area (%)	Output Power without Reflectors (W/m <sup>2</sup> )	Output Power Applying Reflectors(W/m <sup>2</sup> )	Increase in Efficiency (%)
Summer (June 21)	9	19.99	70.02	6.33	7.62	20.38
	10	71.92	101.23	19.33	33.62	73.93
	11	97.37	122.71	27.36	55.02	101.10
	12	93.67	108.17	29.88	59.08	97.72
	Mean	<b>71.41</b>	<b>100.53</b>	<b>20.73</b>	<b>38.84</b>	<b>87.38</b>
Spring (March 21)	9	33.99	29.84	60.03	79.79	32.92
	10	34.79	31.67	75.69	102.86	35.90
	11	34.83	32.49	84.90	116.74	37.50
	12	34.62	32.60	87.65	120.88	37.91
	Mean	<b>34.56</b>	<b>31.69</b>	<b>77.07</b>	<b>105.07</b>	<b>36.33</b>
Winter (December 21)	9	10.91	11.55	89.22	101.69	13.98
	10	12.85	13.43	110.02	128.75	17.02
	11	14.31	14.78	121.13	144.44	19.24
	12	14.76	15.15	124.27	149.08	19.96
	Mean	<b>13.21</b>	<b>13.31</b>	<b>111.16</b>	<b>130.99</b>	<b>17.84</b>

Table 6. The average annual output of the proposed envelope separately sorted by each month according to the best parameters found for the summer on January 21 at 11 O'clock (to reach the best results, the average amount of 4 index-hours of the 21st day of each month has been considered)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
Average of the radiation without applying Reflectors (w/m <sup>2</sup> )	834.58	886.63	927.07	941.95	941.20	935.05	930.48	927.18	918.08	892.30	849.40	816.38	900.02
Average of the radiation applying Reflectors (w/m <sup>2</sup> )	961.56	1075.3	1220.8	1419.6	1609.9	1602.8	1591.9	1401.8	1214.5	1080.9	977.99	925.05	1256.88
Amount of Increase in Radiation (%) (First Dependent Variable)	15.22	21.29	<b>31.69</b>	50.71	71.05	<b>71.41</b>	71.09	51.20	<b>32.29</b>	21.14	15.14	<b>13.31</b>	<b>38.80</b>
Sum of Panels Area without applying Reflectors (m <sup>2</sup> )	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50
Average of increase in Panels Area applying Reflectors (m <sup>2</sup> )	13.31	14.02	15.48	18.32	21.92	23.06	21.97	18.40	15.56	14.07	13.31	13.08	16.87
Amount of Increase in Panels Area (%) (Second Dependent Variable)	15.76	21.93	<b>34.61</b>	59.28	90.59	<b>100.53</b>	91.01	60.01	<b>35.29</b>	22.36	15.73	<b>13.72</b>	<b>46.73</b>
Average of Output Power without applying Reflectors (w/m <sup>2</sup> )	107.03	94.94	77.07	51.99	28.97	20.73	26.66	46.40	70.22	89.89	105.06	111.16	69.18
Average of Output Power applying Reflectors (w/m <sup>2</sup> )	128.31	119.76	105.07	80.47	51.37	38.84	47.36	72.17	96.32	111.03	126.08	130.99	92.31
Amount of Output Power (%)	19.88	26.14	<b>36.33</b>	54.77	77.34	<b>87.38</b>	77.66	55.53	37.17	23.52	20.01	<b>17.84</b>	<b>44.46</b>
Sum of the first and second variables in each month (%)	30.98	43.22	<b>66.30</b>	109.99	161.65	<b>171.94</b>	162.09	111.20	<b>67.58</b>	43.50	30.87	<b>27.03</b>	-----

بود. بنابراین تنظیمات بهینه هندسه پوسته برای کل سال براساس مؤلفه‌های ورودی الگوریتم در ساعت ۱۱ صبح بیست و یکم ژوئن خواهد بود (جدول ۷).

Table 7. Optimum Parameters for the algorithm based on the results of the Optimization

Input Parameters	Values
LAoSM	2°
LAoUM	2°
NoP-V	3
HDoSM	0.06m
SMSA	32°
UMSA	22°

درصد و سطح تحت تابش را بیش از ۱۰۰ درصد افزایش داده است؛ همچنین میانگین سالانه توان خروجی به میزان ۹۲/۳۱ وات بر مترمربع و میانگین بازده سالانه را برابر با ۴۴/۴۶ درصد نسبت به یک نمای یکپارچه با پیل خورشیدی بدون استفاده از بازتابنده افزایش داده است.

بررسی شکل ۱۳، همچنین نشان می‌دهد که تنظیم مقادیر مؤلفه‌های سازنده هندسه پوسته تلفیقی براساس مقادیر بهینه دو فصل بهار (۲۱ مارس) و زمستان (۲۱ دسامبر) در فصل تابستان افزایشی را در شدت و سطح تابش بر روی سطح نما ایجاد نکرده و میانگین بازده سالانه حاصل از این تنظیمات به ترتیب برابر با ۸۴/۵۸ و ۷۹ درصد خواهد



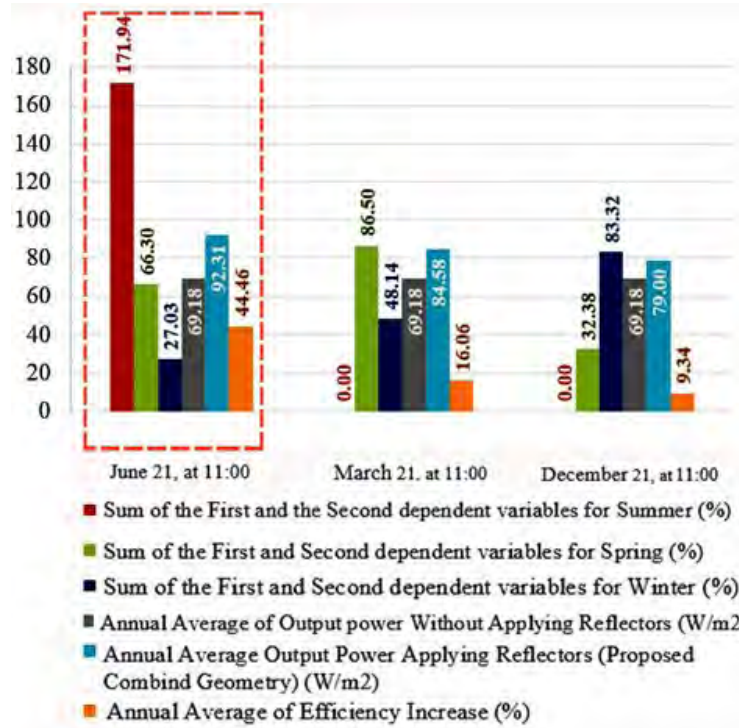


Fig.13. Annual output comparison when the algorithm is adjusted according to the optimum answer of each season (the first and the second dependent variables are “Increase in Radiation” and “Area of Reflections/ Panels area” respectively

پس از تعیین مقادیر بهینه برای متغیرهای مستقل به طوری که بهترین بازده سالانه از سامانه حاصل شود گام نهایی تحقیق به تشخیص میزان اثربخشی هر کدام از متغیرهای مستقل به متغیرهای وابسته تحقیق اختصاص دارد. بدین منظور با مبنا قرار دادن مقادیر متغیرهای مستقل در حالت بهینه، با تغییر هر کدام از متغیرهای مستقل (مؤلفه‌های مولد پوسته)، متغیرهای مستقل دیگر به عنوان متغیر تعدیل کننده قلمداد شده و مقدار آن‌ها ثابت نگه داشته شد و اثر تغییرات هر یک از متغیرها بر متغیرهای وابسته (توابع هدف) در نرم‌افزار دیزاین اکسپلورر<sup>۲۹</sup> اندازه‌گیری گردید (شکل ۱۶). بر این اساس متغیر مستقلی که بزرگ‌ترین دامنه تغییرات را در متغیرهای وابسته ایجاد نماید بیشترین تأثیر را بر بازده سامانه خواهد داشت؛ با توجه به شکل (۱۷- چپ) زاویه عرضی بازتابنده‌های کناری با ۶۲/۲۱ درصد تغییر دامنه بر

همچنین شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مقادیر افزایش شدت تابش، مساحت تحت بازتابش و نهایتاً میانگین ماهانه توان خروجی از سامانه پیشنهادی تحقیق را نشان می‌دهند. بر طبق نمودارها شدت تابش رسیده به صفحات پیل خورشیدی با استفاده از سامانه پیشنهادی در روز اول فصول زمستان، بهار و تابستان به‌طور میانگین به ترتیب ۱۳/۳۱، ۳۱/۶۹ و ۷۱/۴۱ درصد افزایش یافته است و برای همین روزها میانگین سطح بازتابش به ترتیب برابر با ۱۳/۷۳، ۳۵/۲۹ و ۱۰۰/۵۳ درصد افزایش یافته است. همچنین میانگین افزایش در توان الکتریکی خروجی از سامانه نیز برابر با ۱۷/۸۴ درصد برای ابتدای فصل زمستان، ۳۶/۳۳ درصد در روز شروع فصل بهار و ۸۷/۳۸ درصد برای نخستین روز فصل تابستان اندازه‌گیری شده است. به طوری که میانگین افزایش بازده سالانه سامانه پیشنهادی ۴۴/۴۶ درصد محاسبه گردید.

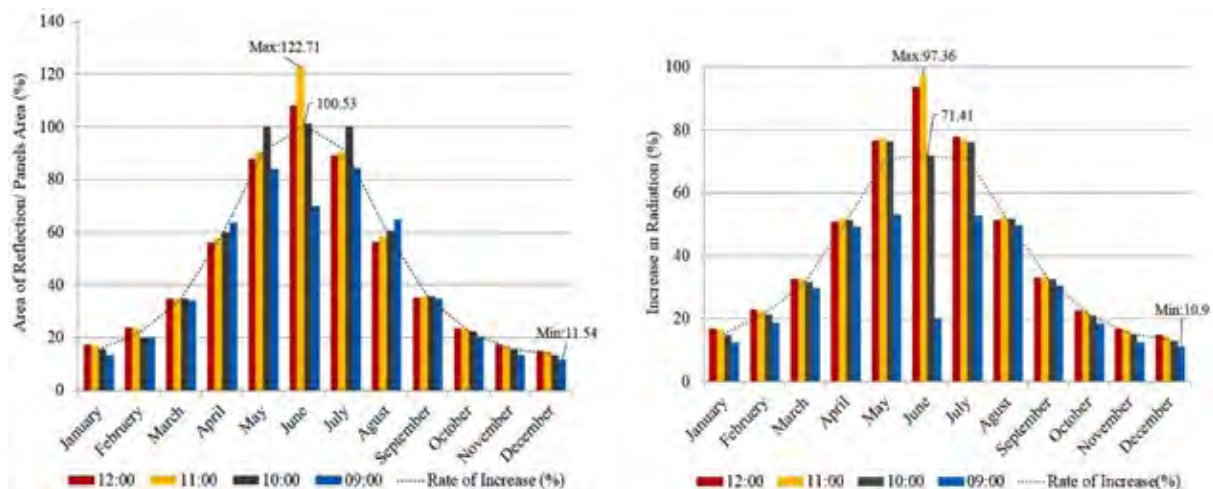


Fig.14. Percentage of Reflection Area (left) and Radiation Increase (right) of the Proposed Combined Geometry comparing to an equal PV-façade without reflectors (21st day of each month considered as an index-day in the calculation)

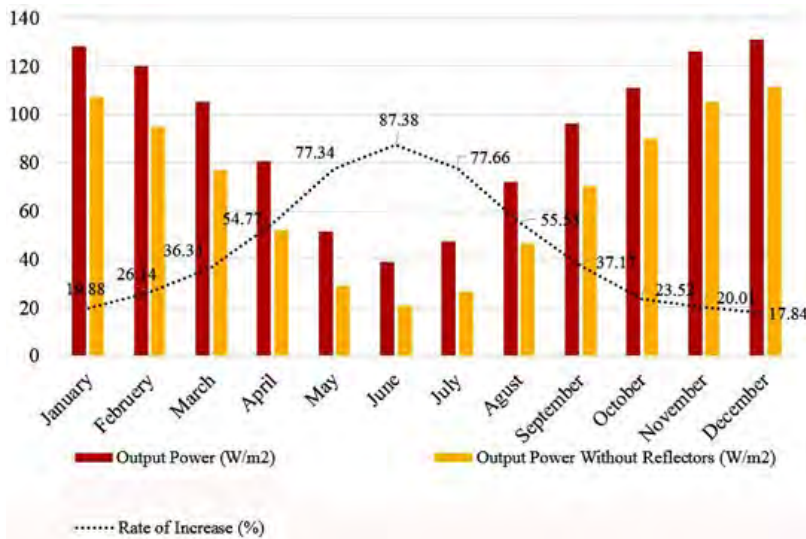


Fig.15. Average Output power of each month within a year when the geometry adjusted according to the optimum parameters (see table 6 and figure 17-right)

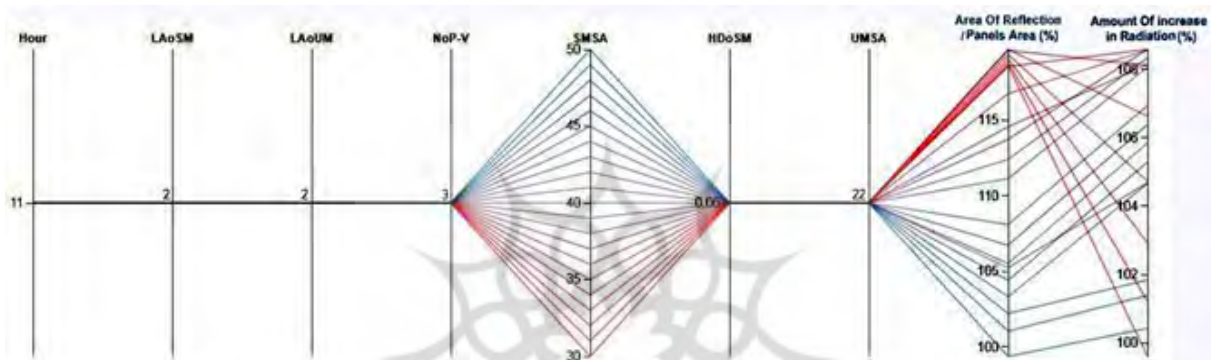


Fig.16. The effect of change in SMSA amounts on the dependent variables (Black columns represent input parameters and the blue ones show the outputs or dependent variables; each continues line stands for one change in SMSA amount).

جنوبی ساختمان مورد استفاده قرار گرفت و پژوهش با بهینه‌سازی هندسه به بررسی بازده نهایی سامانه و تحلیل اثر مولفه‌های سازنده پوسته بر توان الکتریکی خروجی پرداخت. بر این اساس پژوهش حاضر یک تحقیق شبیه‌سازی و کاربردی با ارائه یک الگوی دوپوسته‌ی تلفیقی و بهینه‌یابی کارایی آن در تولید الکتریسیته خورشیدی بر اساس پارامترهای هندسی این الگو است.

در روند انجام تحقیق دو مولفه اصلی شدت تابش رسیده به سطح پوسته و مساحت بازتابش به عنوان توابع هدف در بهینه‌سازی تعیین شد؛ نتایج تحقیق نشان داد که بهره‌گیری از سامانه تلفیقی پیشنهادی در طول سال به‌طور میانگین تا ۳۸/۸ درصد شدت تابش و تا ۴۶/۷۰ درصد سطح پیل‌های خورشیدی تحت بازتابش در سامانه تلفیقی را افزایش خواهد داد. این افزایش در فصل تابستان به ترتیب تا ۷۱/۴۱ و ۱۰۰/۵۳ درصد برای شدت تابش و سطح بازتابش بالا خواهد رفت. به عبارت دیگر با استفاده از الگوی پیشنهادی می‌توان در حدود ۳۰ درصد از سطح نمای جنوبی را به گشایش‌ها اختصاص داد و در عین حال سطح تحت تابش را در طول سال معادل کل سطح نما در نظر گرفت که البته با توجه به ضریب افزایش سطح در تابستان سطح معادل تحت تابش بیش از دو برابر سطح زیر پوشش صفحات خورشیدی است.

سطح بازتابش و ۶۴/۱۴ درصد تغییر در دامنه شدت تابش بیشترین و زاویه طولی بازتابنده‌های زیرین با ۱۵/۸۵ و ۱۵/۹۰ درصد تغییر به ترتیب بر دامنه سطح بازتابش و شدت تابش کمترین تأثیر را بر بازده سامانه دارد. بررسی مقادیر نمودار همچنین نشان می‌دهد که زاویه عرضی بازتابنده‌های زیرین، عمق افقی بازتابنده‌های کناری، تعداد تقسیمات در امتداد قائم و زاویه طولی بازتابنده‌های کناری به ترتیب در جایگاه دوم تا پنجم تأثیر بر توان الکتریکی سامانه قرار دارند. شکل (۱۷-راست) نمایی از خروجی الگوریتم مربوط به ساعت ۱۱ در اول تیرماه (۲۱ ژوئن) را نمایش می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

نماهای یکپارچه با پیل خورشیدی به دلیل زاویه غیر بهینه پوسته ساختمان نسبت به اشعه تابشی به‌خصوص در فصل تابستان بازده پایینی دارند. از طرف دیگر نیاز به طراحی گشایش‌ها بویژه در نمای جنوبی ساختمان با کاهش سطح قابل نصب پیل خورشیدی موجب کاهش مضاعف بازده سامانه خورشیدی می‌شود.

در این تحقیق، راهبرد تلفیق بازتابنده تخت با پیل خورشیدی در قالب یک هندسه پیشنهادی در شکل‌گیری ایده اصلی جهت افزایش بازده پوسته





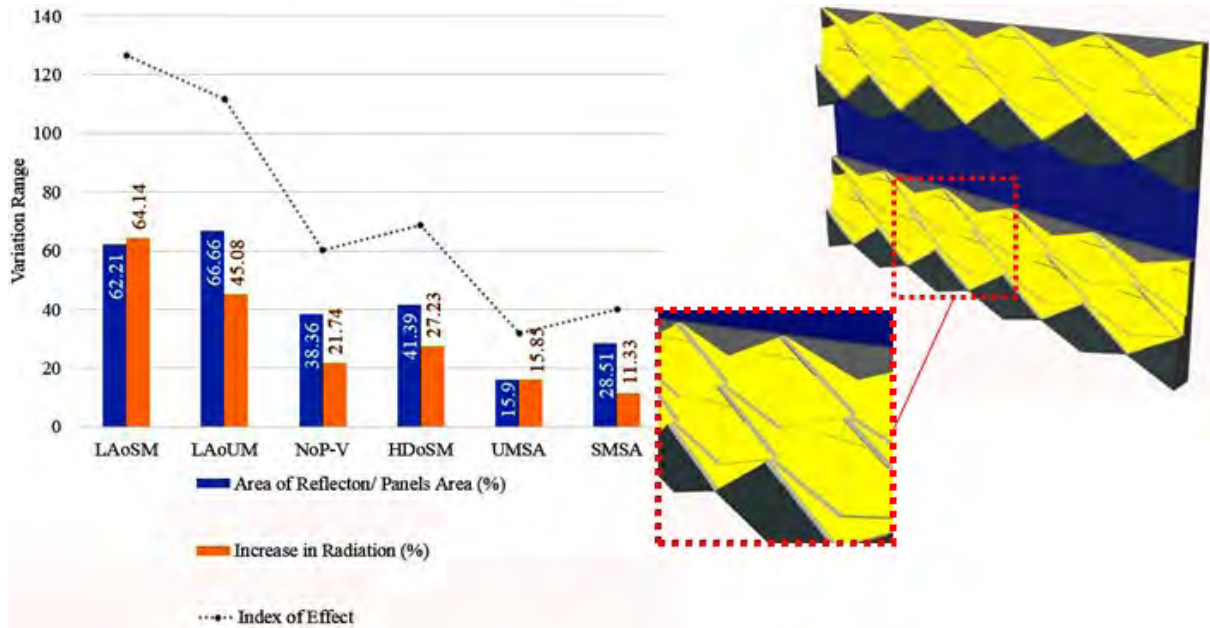


Fig.17. Study of the effect of each independent variables (input parameters) on dependent variables; Sum of the amounts of each two dependent variables is the index of effect (left) and the status of proposed combined geometry on June 21 at 11:00 while adjusted according to the Optimum Input parameters (right).

پی نوشت

1. Solar intensity
2. Parameters
3. Parametric Patterns
4. Concentrators
5. Reflectors
6. Chalmers University of Technology
7. Zemax
8. Grasshopper
9. Rhino Ceros 5
10. Ladybug
11. Meteororm 7

۱۲. عامل Z در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه (شهر همدان) در وجه جنوب ۳/۶ منظور می‌شود (Heidari, 2012, p.77).

۱۳. مطالعات انجام شده در حوزه تهویه پوسته پیل خورشیدی نشان می‌دهد که حداقل عمق محفظه هوای پشت پوسته جهت برقراری تهویه طبیعی حداقل ۰.۰۸ متر است (Gan, 2009, p. 913). مطالعه مستقل دیگری نیز نشان داد که بهترین تناسبات مجرای ورود هوا در پایین مدول به دریچه خروج در بالا، نسبت ۴ به ۱ است (Farhangi, Kh., 2017, p.145).

14. Concept
15. Number of panels in vertical and horizontal direction
16. Underneath mirrors slope and lateral angle
17. Side mirrors slope and lateral angle
18. Outer panels horizontal outcaast angle
19. Horizontal depth of mirrors
20. Area of reflections to panels' area
21. Increase in radiation
22. Area of casted shadow
23. Octopus
24. Genetic Algorithm
25. Genum

۲۶. منظور ساعات‌های ۹،۰۰۰، ۱۰،۰۰۰، ۱۱،۰۰۰ و ۱۲،۰۰۰ است. از آنجا که شدت تابش اشعه خورشید در ساعات ابتدایی و انتهایی روز ضعیف است، آن بخش از محدوده گنبد آسمان که در آن بازه، اشعه تابشی خورشید در طول کل سال دارای شدت و قدرت بالایی است به عنوان پنجره خورشیدی معرفی شده است که شامل محدوده ساعت ۹ صبح تا ۳ بعد از ظهر در تمام فصول است (Lechner, 2015, p. 144). اما از آنجا که وضعیت شدت تابش و مساحت بازتابش در دو طرف ساعت ۱۲ ظهر تقریباً یکسان است لذا در این تحقیق به منظور کاهش زمان شبیه‌سازی و انجام محاسبات صرفاً ۳ ساعت قبل از ظهر به همراه ساعت ۱۲ ظهر به عنوان ساعات شاخص روز در نظر گرفته شد.

پژوهش نشان داد که توان الکتریکی خروجی در فصل تابستان با استفاده از الگوی پیشنهادی تا ۸۸ درصد افزایش خواهد یافت و برای دو فصل زمستان و بهار به ترتیب ۱۷/۸۴ و ۳۴/۳۶ درصد افزایش توان محاسبه شد به طوری که میانگین سالانه توان الکتریکی خروجی در صورت استفاده از پوسته تلفیقی تا ۴۴/۴۶ درصد نسبت به یک پوسته یکپارچه با پیل خورشیدی معمولی افزایش خواهد یافت.

بررسی میزان اثربخشی متغیرهای مستقل تحقیق در توابع هدف نشان داد که از بین مؤلفه‌های ورودی سازنده پوسته، زوایای عرضی بازتابنده‌ها بیشترین و زوایای طولی آن‌ها کمترین تأثیر را بر بازده سامانه دارد. به طوری که درصد تأثیر مهم‌ترین مؤلفه یعنی زاویه عرضی بازتابنده‌های کناری بر افزایش شدت تابش ۶۴/۱۴ درصد و بر افزایش سطح بازتابش ۶۲/۲۱ درصد به دست آمد و برای کم اثرترین مؤلفه بر بازده، که زاویه طولی بازتابنده‌های زیرین است، این مقادیر به ترتیب ۱۵/۸۵ و ۱۵/۹۰ درصد محاسبه گردید. از طرف دیگر تأثیر عمق بازتابنده‌ها بر بازده نیز بیشتر از تأثیر تعداد تقسیمات در امتداد قائم است گرچه اثر هر دو مؤلفه از تأثیر زوایای عرضی بازتابنده‌ها بر بازده کمتر است.

نتایج نشان می‌دهد که الگوی پیشنهادی تحقیق می‌تواند به عنوان یک راهبرد عملی علاوه بر جبران افت بازده ناشی از جهت‌گیری نامناسب پوسته عمودی نما می‌تواند امکان ایجاد طراحی گشایش در پوسته جنوبی ساختمان را بدون کاهش در توان خروجی از سامانه تامین نماید. بدین ترتیب راهکار پیشنهادی در این تحقیق همزمان هر دو هدف استفاده از روشنایی روز و تولید الکتریسیته از سطح کل پوسته را در دستیابی به یک ساختمان انرژی کارا تامین می‌نماید.

## تشکر و قدردانی

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

## تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافی برای ایشان وجود نداشته است.

## تأییدیه‌های اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که کلیه اصول اخلاقی انتشار اثر علمی را براساس اصول اخلاقی COPE رعایت کرده‌اند و در صورت احراز هر یک از موارد تخطی از اصول اخلاقی، حتی پس از انتشار مقاله، حق حذف مقاله و پیگیری مورد را به مجله می‌دهند.

## منابع مالی / حمایت‌ها

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

## مشارکت و مسئولیت نویسندگان

نویسندگان اعلام می‌دارند به‌طور مستقیم در مراحل انجام پژوهش و نگارش مقاله مشارکت فعال داشته و به‌طور برابر مسئولیت تمام محتویات و مطالب گفته‌شده در مقاله را می‌پذیرند.

## References

- Abu-Bakar, S., Muhammad-Suki, F., Ramirez-Iniguez, R., Freier, D., Mallick, T., Munir, A., . . . Bani, N. (2016). Novel Optical Concentrator Technology for Building Integrated Photovoltaic Systems. *2016 World Conference on Innovation, Engineering and Technology* (pp. 1-11). Sapporo, Japan: OpenAIR@ RGU. Retrieved from <http://openair.rgu.ac.uk>
- Ahmad, G., & Hussein, H. (2001). Comparative study of PV modules with and without a tilted plane reflector. *Energy Conversion and Management*, 42, 1327-1333.
- Alhamadany, A. H., Ali, J., & Zain Al-Abideen, F. S. (2016). Effect of angle orientation of flat Mirror Concentrator on solar panel system output. *IOSR Journal of Computer Engineering*, 18(1), 16-23.
- Arshad, R., Tariq, S., Niaz, M. U., & Jamil, M. (2014). Improvement in Solar Panel Efficiency Using Solar Concentration by Simple Mirrors and by Cooling. (pp. 292-295). Islamabad: International Conference on Robotics and Emerging Allied Technology in Engineering.
- Barman, J. (2011). Design and feasibility study of PV Systems in Kenya. *Master's Thesis within the Sustainable Energy System programme*. Gotenberg, Sweden: Chalmers University of Technology.
- Bilal, M., Arbab, M. N., Zain, M., Afridi, A., & Khattak, A. (2017). Increasing the output power and efficiency of solar panel by using concentrator Photovoltaics (CPV). *International Journal of Engineering Works*, 3(12), 98-102.
- BP-PL.C. (2019). *BP Statistical Review of World Energy*. London.
- Delisle, V., & Kummert, M. (2014). A novel approach to compare building-integrated photovoltaics/thermal air collectors to side-by-side PV modules and solar thermal collectors. *Solar Energy*, 100, 50-65.
- DPEA, D. f. (2016). *Energy Balance - Part One*. Tehran: Power and Energy Deputy Department, Iran Ministry of Energy (In Persian).
- Farhangi-Khanghah, A., Gorji-Mahlabani, Y., & Mofidi-Shemirani, M. (2017). Improving the Efficiency of Electricity-Generating Building Envelopes Using a Hybrid System of Flat Concentrator & Photovoltaic Panels (FCPV) in South Facade. *Journal of Iranian Architecture & Urbanism*, 47-61 (In Persian).
- Fraas, L., & Partain, L. (Eds.). (2010). *Solar Cells and Their Applications*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc.
- Gan, G. (2009). Effect of air gap on the aerformance of building Integrated Photovoltaics. *Energy*, 14, 913-921.
- Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T., & Zeumer, M. (2008). *Energy Manual; Sustainable Architecture*. Basel, Switzerland: Kosel GmbH & Co.KG, Altusreid-krugzell.
- Heidari, S. (2012). *Architecture and Lighting*. Tehran, Iran: University of Tehran (In Persian).
- Helmy, M. A., Khalifa, E., Oksha, A., & Elhaddad, A. (2014). Effect of reflector application on PV panel performance under Egyptian condition. *Scientific Papers Series Management, Economic*



- Engineering in Agriculture and Rural Development*, 14(3), 103-106.
16. IGMC. (2019). *Monitoring and analysis of the Iranian electricity market*. Tehran: Iran Grid Management Company (In Persian).
  17. Kumar, R., Kaushik, S., & Garg, H. (1995). Analytical Study Of Collector Solar-Gain Enhancement by Multiple ereflectors. *Energy*, 511-522.
  18. Matsushima, T., T. Setaka, & Muroyama, S. (2003). Concentrating Solar Module with horizontal reflectors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 75, 603-612.
  19. PVLighthouse. (2020, 06 14). *Solar Spectrum Calculator*. Retrieved from PVLighthouse: [www.PVLighthouse.com.au](http://www.PVLighthouse.com.au)
  20. PVSol, C. (2015). *PV\*SOL help*. Retrieved 11 02, 2019, from <http://help.valentin-software.com/pvsol/calculation/pv-modules/module-temperature/>
  21. Ronnelid, M., Karlsson, B., Krohn, P., & Wennerberg, J. (2000). Booster reflectors for PV modules in Sweden. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8, 279-291.
  22. Sathyanarayana, P., Ballal, R., kumar, G., & Laksmi sagar, P. (2014). Effect of light concentration by flat mirror reflectors on electrical power output of the photovoltaic panel. *Carbon-Science and Technology*, 6(1), 356-363.
  23. Seitel, s. C. (1975). Collector Performance Enhancement With Flat Reflectors. *Solar Energy*, 17, 291-295.
  24. Siahaan, Y., & Siswono , H. (2019). Analysis the effect of reflector (flat mirror, convex mirror, and concave mirror) on solar panel. *ernational Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 943-952.
  25. Soria, B., Gerritsen, E., Leffillaster, P., & Broquin, J.-E. (2016). A study of annual performance of bifacial photovoltaic modules in the case of vertical facade integration. 52-68.
  26. Tabaei, H., & Ameri, M. (2015). Improving The Effectiveness Of Photovoltaic Water Pumping System By Using Booster Reflector and Cooling Array Surface By A Film Of Water. *Transactions of Meccchanical Engineering*, 39, 51-60.
  27. Tabakovic, M., Fechner, H., Sark, W. V., Louwen, A., Georghiou, G., Makrides, G., . . . Betz, S. (2017). Status and outlook for building integrated photovoltaics (BIPV) in relation to educational needs in the BIPV sector. *Energy Procedia*, 993-999.
  28. Tabor, H. (1958). Stationary mirror systems for solar collectors. *Solar Energy*, 2, 27-33.





دو فصلنامه علمی  
معماری و شهرسازی ایران