Journal of Sustainable Architecture and Environment
Vol 1, No 1, Spring 2023
https://sanad.iau.ir/journal/jsae

Research Paper

Designing Convertible Structure for building façade to control daylight (Case study: Snaspdragon)

Zahra Yarmahmoodi: PhD Student, Department of Architecture, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
Tahereh Nasr:* Associate Professor, Department of Architecture,Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Received: 2023/04/11 **PP** 73-92 **Accepted:** 2023/06/05

Abstract
Properly designing a building's façade can significantly reduce energy consumption and protect its internal environment. One of the main concerns of architects is designing adaptable façades that can adjust to the surrounding environment. Therefore, the main goal of this research is to design an adaptable building façade by drawing inspiration from natural patterns. Living organisms in nature react to external factors and have developed many solutions for compatibility and adaptability. The snapdragon plant pattern has been chosen as a case study to inspire the movement mechanism. Plants have many similarities with buildings, as they are fixed in place by roots and also react to changes in their environment. Given the widespread use of energy-saving strategies in buildings, this study has focused on controlling daylight entering the building through the façade in Shiraz's climate. The research method is simulation-based modeling. The façade model was developed based on the behavioral pattern of the snapdragon using Rhino 6 software and Grasshopper plug-in. Energy radiation and daylight were analyzed using Ladybug and Honeybee plug-ins, respectively. The results indicate that the designed façade in Shiraz's climate during the month of August, from 8 am to 4 pm, can reduce daylight entering the building by up to 75% in closed panel mode and absorb 64% of the radiation energy through the transparent surface of the building. This results in a 16% reduction in indoor temperature. Therefore, the designed façade effectively controls daylight entering the building.

Keywords: Convertible Structure, Kinetic Shading Device, Plant Pattern, Daylight Control.

Citation: Yarmahmoodi, Z; Nasr.(2023): **Designing Convertible Structure for building façade to control daylight (Case study: Snapdragon),** Journal of Sustainable Architecture and Environment, Vol 1, No 1, Shiraz, PP 73-92.

*. **Corresponding author:** Tahereh Nasr, **Email:** Tahereh.nasr@iau.ac.ir, **Tell:** +989173131571

Extended Abstract

Introduction

After the 19th century, the building facade has received attention in search of new production methods and materials, and after that, with the increasing importance of functions such as: reducing energy consumption, cooling and heating load, and daylight control, etc., the building facade design is appropriate to the changes. The surrounding environment and providing the comfort of the residents has been raised as the main concern of the designers. In architecture, kinetic building facade are usually designed specifically for the same project and do not provide a general pattern for designers to use. In addition, the use of rigid mechanical systems increases the production, execution and maintenance of the shading device structure. Therefore, the main goal of the current research is to design the kinetic facade shading device inspired by the natural pattern. Because the patterns in nature are alive, and this causes them to function properly against changes in the surrounding environment. In the current research, a plant model (Snapdragon) has been chosen as a source of inspiration. The similarity of the protective function of plants with the building has led to the selection of the plant pattern as a source of inspiration for the design. In fact, plants, like buildings, are fixed in place by their roots, however, they react to the surrounding environment to protect themselves. Finally, the current research tries to answer the question, how can the movement mechanism of the Snapdragon be used in the design of the kinetic facade shading device? It seems that by studying the researches of biologists in this regard and in the field, it is possible to convert the movement pattern of the plant into the kinetic algorithm of the shading device.

Methodology

Considering that the main goal of the current research is to design a kinetic building facade with a convertible structure and inspired by the plant pattern to control daylight in the Shiraz climate, therefore the research method is modeling-simulation. At first, the theoretical basics and analysis of the Snapdragon were carried out by field and library surveys, and after that, the movement pattern of the Snapdragon was converted into the kinetic algorithm of the building facade in Rhino 6 software and the Grasshopper plugin. Finally, the analysis of sunlight radiation and daylight control in Shiraz climate has been done by Ladybug and Honeybee plugins. The data obtained from the daylight analyzes have been evaluated and reviewed quantitatively and qualitatively in the findings section. It should be noted that in new researches for modular and parametric design, the Grasshopper plugin is used, and with other plugins such as Ladybug and Honeybee in the same environment, various analyzes are performed on the model to achieve optimal performance. The proposed add-on engine is Energy Plus, and it was developed and approved by the US Department of Energy in 2011. Therefore, the method and tools of the current research are valid based on previous researches.

Results and discussion

Nowadays, rigid members and mechanical joints are used to achieve a responsive and compatible architecture with the surrounding conditions, especially for the design of kinetic building facade. Despite the fact that this method has many advantages, a series of negative consequences such as the high cost of construction, maintenance, etc. appear after it. Therefore, it is necessary to use flexible patterns for design to reduce the problems raised. The Snapdragon has a flexible structure, so that a certain type of folding has caused the flower's unique behavior pattern. The petals of the Snapdragon are divided into two upper and lower parts, and the two flower petals have created a shape similar to a mouth. By pressing both sides of the petals, the flower opens. The important thing is that in this part, only the lower petal can be moved, and the upper petal remains fixed. In fact, the lower petal bends due to the pressure applied to its two sides, and this bending is the unique movement of the flower. Finally, this structure can be used to design the building convertible shading device.

Conclusion:

The results indicate that the shading device designed in the climate of Shiraz, in August from 8:00 am to 4:00 pm on the 10th day, in the open panel mode up to 33%, in the semi-open panel mode up to 44% and in the closed panel mode up to 75% of the daylight entrance is reduced and reduces the

radiant energy absorbed by the transparent surface of the building by 39% in the open state, 52% in the semi-open state, and 64% in the closed state. This has reduced the indoor temperature by 4% with the shading device open panels, 8% with half-open panels, and 16% with the shading device closed panel. As a result, the designed shading facade has a favorable performance in the field of daylight control. The current shading device is designed para metrically and by changing one component, the whole panels open and closes. For this reason, researchers and designers can use this shading device according to the sun path and the chosen climate of their research and project. Finally, this shading device has flexibility and is dynamic and stable. It should be noted that this facade is designed in such a way that it responds to the needs of users with a convertible structure and reacts to changes in the surrounding environment. Another important point is that the shading device is designed in a modular way and by causing damage to one of the parts, other parts can continue to operate. Therefore, in terms of production, implementation and maintenance, it is economical and has good performance. In addition, the modular property of the shading device allows the shell to be expandable according to the surface required for the cover or the geometry chosen by the designers. Also, in general, it can be stated that the use of convertible structures in kinetic design can reduce the problems in the case of mechanical systems and provide a design with high functional efficiency. In the future, researchers can design an executive structure for the presented ideas or complete this shading device design process by examining other plant patterns.

فصلنامه معماری و محیط پایدار
دوره ۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲
https://sanad.iau.ir/journal/jsae

مقاله پژوهشی

بهره‌گیری از الگوی تغییرپذیر جهت طراحی پوسته‌ی ساختمان در راستای کنترل نور روز (نمونه‌موردی: گل میمون)[1]

زهرا یارمحمودی: دانشجوی دکترای معماری، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
طاهره نصر [2]: دانشیار، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۲ صص ۹۲-۷۳ **پذیرش:** ۱۴۰۲/۰۳/۱۵

چکیده

پوسته‌ی ساختمان محیط داخلی را حفاظت کرده و طراحی صحیح پوسته می‌تواند مصرف انرژی را کاهش دهد. طراحی پوسته‌های تغییرپذیر جهت انطباق با محیط پیرامون، یکی از دغدغه‌های اصلی طراحان است.بنابراین هدف کلان پژوهش حاضر طراحی پوسته‌ی تغییرپذیر ساختمان با بهره‌گیری از الگوهای طبیعی است. موجودات در طبیعت زنده هستند، به همین دلیل در برابر عوامل خارجی واکنش نشان داده و راه‌حل‌های زیادی در زمینه‌ی سازگاری و انطباق‌پذیری در بردارند. الگوی گیاهی (گل میمون) به عنوان نمونه موردی در پژوهش حاضر جهت الهام از مکانیزم حرکتی انتخاب شده است. گیاهان در عملکرد، تشابه زیادی با ساختمان دارند. هم در جای خود توسط ریشه ثابت هستند و هم به تغییرات محیط پیرامون واکنش نشان می‌دهند. باتوجه به اینکه شاخه‌های کاهش مصرف انرژی در ساختمان بسیار گسترده است، بنابراین در این تحقیق، رویکرد کنترل ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان توسط پوسته‌ی نما در اقلیم شیراز انتخاب شده است. روش پژوهش مدلسازی-شبیه‌سازی است. به این صورت که توسط نرم‌افزار راینو۶ و افزونه‌ی گرس‌هاپر، مدل پوسته براساس الگوی رفتاری گل میمون، الگوریتم نویسی شده و در نهایت توسط افزونه لیدی‌باگ، انرژی تابشی و توسط افزونه هانی‌بی، نور روز تحلیل شده است. نتایج حاصله حاکی از آن است که پوسته‌ی طراحی شده در اقلیم شیراز، ماه مرداد از ساعت ۸ تا ۱۶ در روز ۱۰ام می‌تواند در حالت پنل‌های بسته تا ۷۵ درصد از ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان و ۶۴ درصد از انرژی تابشی جذب شده توسط سطح شفاف نمای ساختمان کم کند. همین امر باعث کاهش ۱۶ درصدی دمای فضای داخل ساختمان می‌شود. در نتیجه پوسته‌ی طراحی شده دارای عملکرد مطلوب در زمینه‌ی کنترل ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان است.

واژه‌های کلیدی: ساختار تغییرپذیر، سایبان متحرک، الگوی گیاهی، کنترل نور روز.

استناد: یارمحمودی، زهرا؛ نصر، طاهره. (۱۴۰۲): **بهره‌گیری از الگوی تغییرپذیر جهت طراحی پوسته‌ی ساختمان در راستای کنترل ورود نور روز (نمونه‌موردی: گل میمون)**، فصلنامه معماری و محیط پایدار، سال ۱، شماره ۱، شیراز، صص ۷۳-۹۲.

[1] این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول با عنوان «انطباق الگوریتم حرکتی گیاهان در راستای هوشمندسازی اقلیمی نمای ساختمان» به راهنمایی نگارنده دوم و مشاوره نگارنده سوم در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز است.

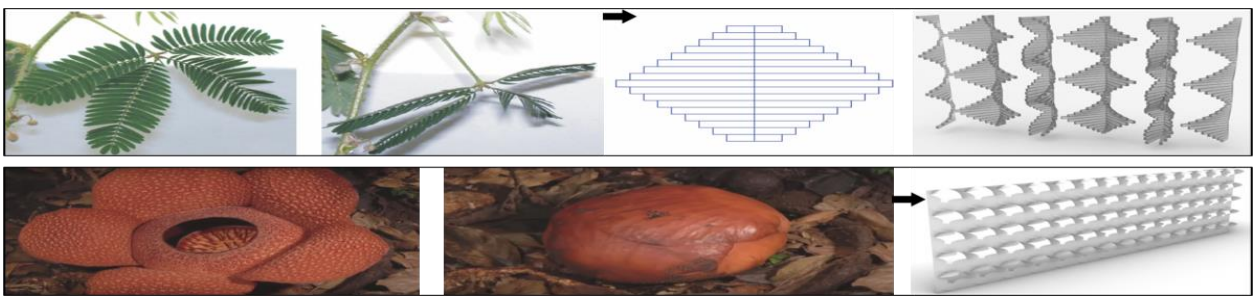
[2] . **نویسنده مسئول:** طاهره نصر، **پست الکترونیکی:** Tahereh.nasr@iau.ac.ir ، **تلفن:** ۰۹۱۷۳۱۳۱۵۷۱

مقدّمه

پوسته‌ی ساختمان بعد از قرن نوزدهم به دنبال روش‌های تولید و مصالح جدید مورد توجه قرار گرفته است (Sadeghpour & Yavari, 2022: 101) و پس از آن با افزایش اهمیت عملکردهایی مانند: کاهش مصرف انرژی و بار سرمایش و گرمایش و کنترل ورود نور روز و غیره، طراحی پوسته‌ی ساختمان متناسب با تغییرات محیط پیرامون و فراهم کردن آسایش ساکنین به عنوان دغدغه‌ی اصلی طراحان مطرح شده است (Elkhayat, 2014: 816). در معماری، پوسته‌های هوشمند ساختمان معمولا برای همان پروژه و به صورت خاص طراحی می‌شود و الگوی کلی جهت بهره‌گیری طراحان ارائه نمی‌دهد (ElGhazi et al, 2017: 1).علاوه برآن، بهره‌گیری از سیستم‌های مکانیکی صلب باعث افزایش تولید، اجرا و نگهداری ساختار پوسته می‌شود. بنابراین، هدف کلان پژوهش حاضر طراحی پوسته‌ی متحرک نمای ساختمان با الهام از الگوی طبیعی است. زیرا الگوهای موجود در طبیعت زنده هستند و همین امر باعث عملکرد مناسب آن‌ها در برابر تغییرات محیط پیرامون می‌شود(Li & Wang, 2016). در پژوهش حاضر، الگوی گیاهی (گل میمون) به عنوان منبع الهام انتخاب شده است. تشابه عملکرد محافظتی گیاهان با ساختمان باعث انتخاب الگوی گیاهی به عنوان منبع الهام طرح شده است. در حقیقت گیاهان مانند ساختمان توسط ریشه در جای خود ثابت هستند با این وجود برای محافظت از خود در برابر محیط پیرامون واکنش نشان می‌دهند (Li & Wang, 2016).در نهایت پژوهش حاضر درصدد پاسخ به این سوال است که چگونه می‌توان از مکانیزم حرکتی گل میمون در راستای طراحی پوسته‌ی متحرک ساختمان بهره گرفت؟ به نظر می‌رسد که با مطالعه‌ی پژوهش‌های بایولوژیست‌ها در این رابطه و به صورت میدانی بتوان الگوی حرکتی گیاه را به الگوریتم حرکتی پوسته‌ی نما تبدیل کرد.

پیشینه و مبانی نظری تحقیق

با توجه به اهمیت طراحی پوسته‌ی نمای ساختمان، پژوهش‌های متعددی در این زمینه صورت گرفته است. به عنوان مثال: حیدری و همکاران در پژوهشی، سایبان‌های ثابت را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که سایبان هندسی، دارای بازده عملکرد بالاتری نسبت به سایر سایبان‌های ثابت است. با وجود اینکه سایبان‌های متحرک امروزه عملکرد بهتری نسبت به سایبان ثابت دارد، اما سایبان ثابت اقتصادی‌تر می‌باشد (Heidari et al, 2021: 170).نصر و یارمحمودی در مقاله‌ای تحت عنوان «مقایسهٔ عملکرد انواع سایبان ثابت در جهت کنترل نور روز ساختمان (مطالعه موردی: جبههٔ جنوبی در اقلیم یزد)»، سایبان‌های موجود در گذشته را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه دست یافتند که سایبان هندسی و افقی که در حقیقت تکامل یافته‌ی سایبان‌های معماری بومی ایران است، دارای عملکرد مناسبی می‌باشد (Nasr & Yarmahmoodi, 2022: 33).رزازی و مظفری در مقاله‌ای تحت عنوان «پوسته‌های سازگار و انطباق‌پذیر با الگوپذیری از گیاهان در طبیعت»، به بررسی نمونه‌های موردی الهام گرفته شده از گیاهان پرداختند و در نهایت چند الگوی رفتاری حرکتی گیاهان را به همراه سایبان الهام گرفته شده از مکانیزم حرکتی گیاهان ارائه دادند(Razazi et al., 2022: 75). یارمحمودی و همکاران در مقاله‌ای تحت عنوان طراحی الگوریتمیک نمای هوشمند ساختمان در جهت کنترل نور روز با الهام از الگوی حرکتی گل زنبق، مکانیزم حرکتی گل زنبق بدبو را مورد بررسی قرار داده و الگوریتم حرکتی نما با الهام از مکانیزم حرکتی گل زنبق ارائه دادند. الگوی مطرح شده دارای قابلیت گسترش‌پذیری است و طراحان می‌توانند متناسب با پروژه خود از آن بهره گیرند (Yarmahmoodi et al, 2023). نصر و همکاران در مقاله‌ای تحت عنوان «تاثیر هندسه پوسته متحرک بر بهینه‌سازی مصرف انرژی با الهام از الگوریتم حرکتی گیاه قهر و آشتی»، الگوی رفتاری گیاه قهر و آشتی را مورد بررسی قرار داده و در نهایت پوسته‌ی متحرک هوشمند نمای ساختمان را با قابلیت انطباق‌پذیری ارائه دادند (Nasr et al, 2020: 219).در ادامه فرم پوسته‌های الهام گرفته شده از گل زنبق بدبو و گیاه قهر و آشتی مطرح شده است.



شکل۱- پوسته‌های الهام گرفته شده از مکانیزم حرکتی گل زنبق بدبو و گیاه قهر و آشتی (منبع: نگارندگان برگرفته از Yarmahmoodi et al., 2023) و (Nasr et al., 2020))

باتوجه به اینکه داده‌های الگوی حرکتی گل میمون توسط طراح به سیستم ارائه شده، بنابراین به صورت پیش فرض نبوده و نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر از نظر مدلسازی، تحلیل رفتار گل میمون و تحلیل‌های نور روز و دما کاملا نوآورانه است.

ساختارهای تغییرپذیر از گذشته تا امروز در قالب کاربردی و کالبدی مورد استفاده قرار گرفته است (Jafarian et al, 2021: 47).امروزه با گسترش تکنولوژی، بهره‌گیری از این گونه ساختارها افزایش یافته است (Knippers & Speck, 2012).ساختارهای تغییرپذیر قابلیت این را دارد که به صورت موضعی، قسمتی از اجزاء تشکیل دهنده‌ی فضای معماری را در برگیرد (Megahed, 2017: 130).به عنوان مثال: جداره‌ی باز و بسته شونده باعث تفکیک فضای داخل و خارج شده و یا پوسته‌های متحرک نما باعث کنترل ورود نور خورشید به فضای داخلی ساختمان شده و همچنین سقف‌های تغییرپذیر که باعث تهویه و تغییر جوی فضای زیر خود شده است (Asefi et al, 2015)ساختارهای تغییرپذیر از نظر نوع و جهت حرکت به دسته‌های افقی، عمودی، مفصلی، تاشو و انبساط یافته تقسیم می‌شود (Kamarian & Sadeghpour, 2012)سازه‌های باز و بسته شونده زیرمجموعه‌ای از ساختارهای تغییرپذیر محسوب می‌شود (Ahmadnejad Karimi & Haghparast, 2012). این نوع سازه‌ها به دلیل سبکی و سهولت در تولید، اجرا، نگهداری و حمل و نقل، اقتصادی هستند. به همین دلیل هدف کلان پژوهش حاضر طراحی سایبان نمای تغییرپذیر است که از الگوی باز و بسته شونده‌ی گل میمون الهام گرفته است.

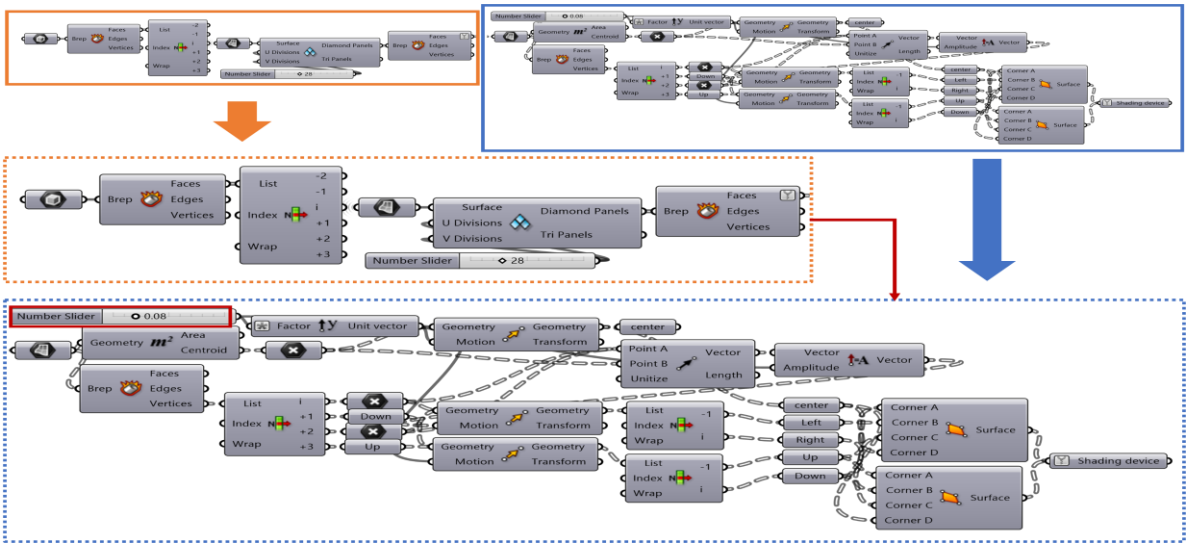
گل میمون[1]دارای ساختار انعطاف‌پذیر است، به صورتی که نوع خاصی از تاشدگی باعث الگوی رفتاری منحصربه‌فرد گل شده است. گلبرگ‌های گل میمون به دو بخش بالایی و پایینی تقسیم شده (Matini & Knippers, 2008: 147)،که در شکل۲، سمت راست نشان داده شده و دو گلبرگ گل، فرمی شبیه دهان را ایجاد کرده است. با فشار دادن دو طرف گلبرگ‌ها، گل باز می‌شود (Charpentier et al, 2017). نکته حائز اهمیت آن است که در این قسمت، فقط گلبرگ پایینی قابل حرکت بوده و گلبرگ بالایی ثابت می‌ماند (Matini, 2007) درحقیقت گلبرگ پایینی در اثر فشار وارد شده به دو طرف آن خم می‌شود و این خم شدگی حرکت منحصربه‌فرد گل محسوب می‌شود. در نهایت از این ساختار می‌توان برای طراحی پوسته‌ی تغییرپذیر نمای ساختمان بهره گرفت.

شکل۲- الگوی باز و بسته شدن گل میمون (منبع: نگارندگان)

بنابراین پوسته‌ی الهام گرفته شده از مکانیزم حرکتی گل میمون یک ساختار تغییرپذیر از نوع خم‌شو می‌باشد. سازه‌های خم‌شو از متریال الاستیک تشکیل شده و با وارد شدن نیرو به دو طرف آن به شکل منحنی در می‌آید(Behnava & Pourzargar, 2021: 49). به همین دلیل، بعد از قطع شدن نیروی وارد شده، به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد. به همین دلیل این نوع ساختار خم‌شو، به صورت فعال[2]است (Matini & Kakouee, 2019: 39).سازه‌های خم‌شو از نظر اجرایی تاکنون مورد توجه پژوهشگران بوده، اما اخیرا به عنوان سازه‌های تغییرپذیر نیز از نظر ایده‌ی طراحی توجه معماران را به خود جلب کرده است. ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو از نظر طراحی، تولید و اجرا دارای نکات مثبت زیادی است که شامل: حذف عناصر لولایی، کاهش فرسودگی، سادگی سیستم، هندسه‌ی جدید، هماهنگی با بناهای جدید، گسترش پذیر و غیره می‌باشد (Matini, 2015: 67). همین امر عامل انتخاب گل میمون به عنوان منبع الهام طراحی سایبان هوشمند نمای ساختمان است. نکته حائز اهمیت دیگر آن است که سبک بودن، قابلیت گسترش پذیری و جمع‌شدن در کوچکترین فضا باعث مطلوب‌تر عمل کردن ساختار تغییرپذیر خم‌شو می‌شود.

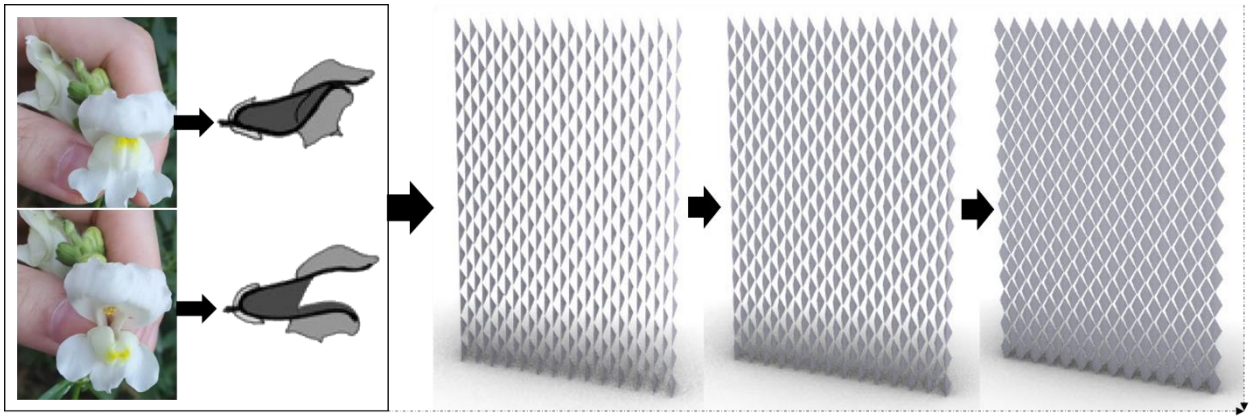
[1] Snapdragon
[2] Active Bending

باتوجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی تحلیل رفتار حرکتی گل میمون، مدول لوزی شکل جهت طراحی پوسته برگزیده شده تا با فشار وارده به دو راس سمت راست و چپ لوزی، راس سمت بالا و پایین در محور Y به سمت منفی حرکت کرده و پوسته باز می‌شود. پوسته‌ی مدلسازی شده به صورت پارامتریک طراحی شده و با تغییر فاکتور مشخص شده با مستطیل قرمز رنگ، کل پوسته باز و بسته می‌شود. در ادامه شکل۳، قرار دارد که نشان دهنده‌ی الگوریتم حرکتی و مدلسازی پوسته‌ی تغییرپذیر ساختمان شده است.



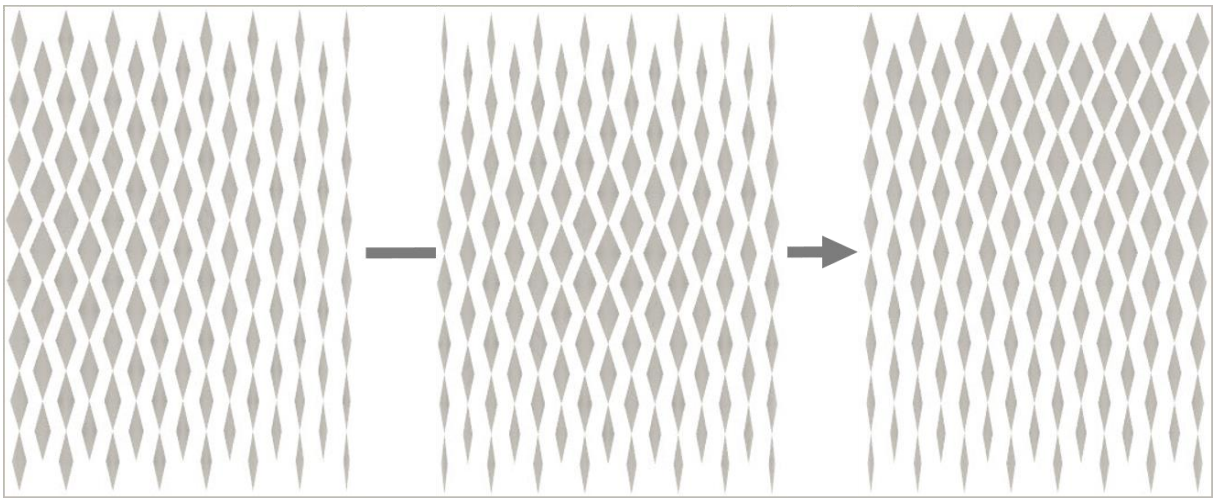
شکل۳- الگوریتم حرکتی پارامتریک گل میمون (منبع: نگارندگان)

باتوجه به شکل۴، گلبرگ پایین گل میمون با فشارهای جانبی وارد شده، به صورت خم‌شو، باز شده و گلبرگ بالایی ثابت باقی‌مانده است. بنابراین در پوسته‌ی مدل شده نیز که به ترتیب از چپ به راست در حالت باز، نیمه‌باز و بسته قرار دارد، با فشارهای جانبی به دو راس سمت چپ و راست، مدول‌ها یا پنل‌های پوسته‌ی تغییرپذیر نمای ساختمان باز و بسته می‌شود.



شکل۴- مدل پوسته‌ی تغییرپذیر براساس الگوی باز و بسته شدن گل میمون (منبع: نگارندگان)

باتوجه به شکل۵، مدول‌های پوسته با هم باز و بسته شده است. جهت جلوگیری از ایجاد یکنواختی در طراحی سایبان هوشمند نمای ساختمان، مدول‌ها می‌توانند متناسب با برنامه‌ای که به آن‌ها داده می‌شود به صورت مجزا باز و بسته شده و نمایی پویا، انعطاف‌پذیر را تشکیل دهد. به این صورت که می‌توان نقطه یا خطی صاف یا منحنی بر روی پوسته در نظر گرفت که مدول‌ها هر چه به نقطه یا خط نزدیک‌تر می‌شوند، بازتر یا بسته‌تر شود. در ادامه شکل۷، قرار دارد که نشان دهنده‌ی فرآیند مطرح شده است.



شکل۵- طرحی سایبان نما به صورت مدولی و پارامتریک

به عنوان مثال، باتوجه به اینکه میزان تابش نور خورشید در طبقات بالایی ساختمان نسبت به طبقات پایین افزایش می‌یابد، می‌توان از مکانیزم باز و بسته شدن شکل سمت راست در طراحی سایبان نمای ساختمان بهره گرفت.

مواد و روش تحقیق

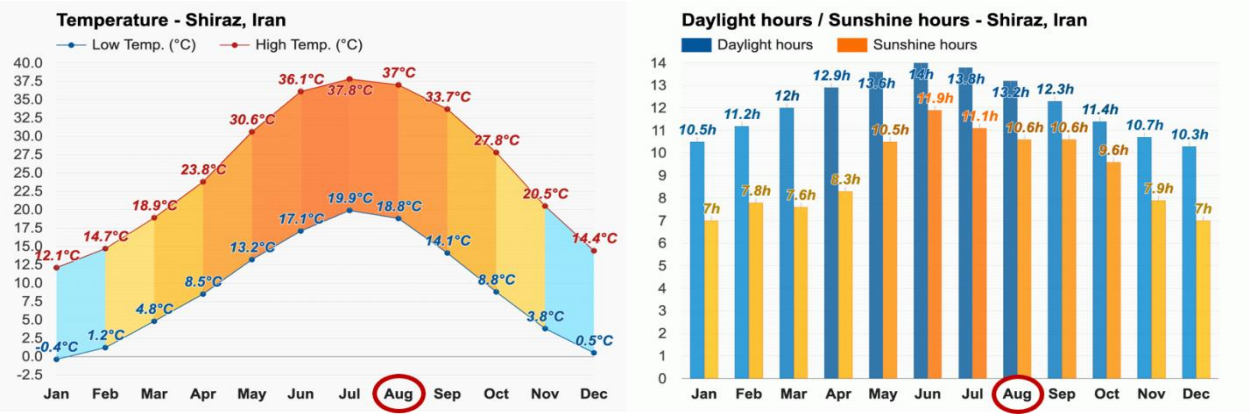
با توجه به اینکه هدف کلان پژوهش حاضر، طراحی پوسته‌ی هوشمند ساختمان با ساختار تغییرپذیر و الهام گرفته شده از الگوی گیاهی در راستای کنترل ورود نور روز در اقلیم شیراز است، بنابراین روش پژوهش با ماهیت ترکیبی (کمی-کیفی) و به صورت مدلسازی-شبیه‌سازی می‌باشد. در ابتدا بخش مبانی‌نظری و تحلیل گل میمون توسط بررسی‌های میدانی و کتابخانه‌ای انجام شده و پس از آن، تبدیل الگوی حرکتی گل میمون به الگوریتم حرکتی پوسته‌ی ساختمان در نرم‌افزار راینو۶[1] و افزونه‌ی گرس‌هاپر[2]صورت گرفته است. در نهایت تحلیل انرژی تابشی[3]و نور روز[4]در اقلیم شیراز توسط افزونه‌ی لیدی‌باگ[5]و هانی‌بی[6]انجام شده است. داده‌های بدست آمده از تحلیل‌های نور روز به صورت کمی و کیفی در بخش یافته‌ها مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است.

لازم به ذکر است که در پژوهش‌های جدید برای طراحی مدولی و پارامتریک، از افزونه‌ی گرس‌هاپر استفاده شده که با سایر افزونه‌ها مانند لیدی‌باگ و هانی‌بی در همان محیط، تحلیل‌های گوناگون بر روی مدل جهت رسیدن به عملکرد مطلوب انجام می‌شود. موتور افزونه‌های مطرح شده انرژی پلاس است (Bano & Sehgal, 2019: 66) و در سال ۲۰۱۱ توسط بخش انرژی آمریکا گسترش یافته و مورد تایید است (Tabares-Velasco et al, 2012: 186).بنابراین روش و ابزار پژوهش حاضر براساس پژوهش‌های پیشین دارای اعتبار است.

تحلیل وضعیت اقلیمی

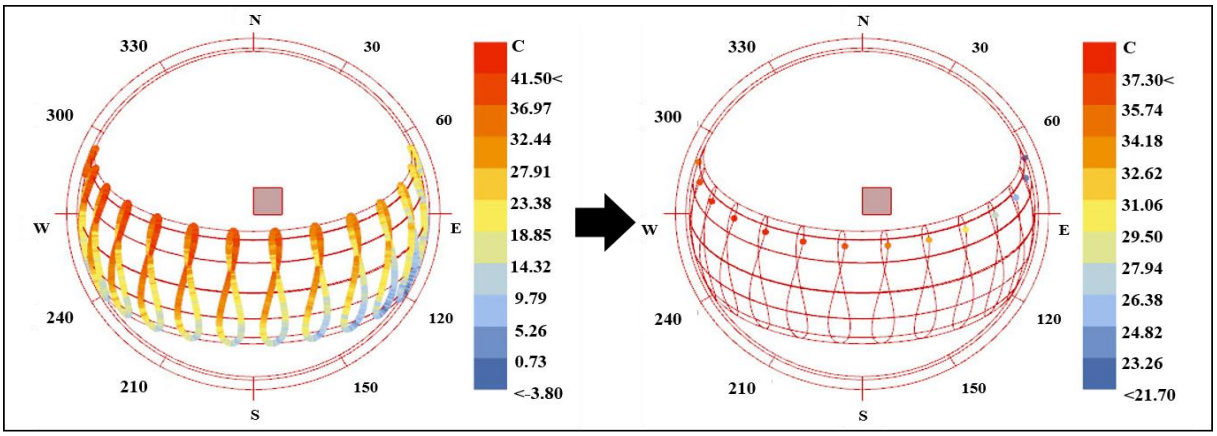
شهر شیراز، مرکز استان فارس است و در دشتی با هندسه‌ی مستطیل در ۲۹ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است (Karamirad & Vakilinezhad, 2022: 5).ارتفاع شهر از سطح دریا، ۱۵۴۰ متر است. متوسط دمای سالانه ۱۷,۳ درجه‌ی سانتی‌گراد و حداکثر درجه حرارت به ۴۳,۲ درجه‌ی سانتی‌گراد و حداقل درجه حرارت ۱۴- درجه سانتی‌گراد است (Molaei et al., 2020: 157) باتوجه به شکل۶، در ادامه ماه انتخاب شده از فصل تابستان با حداکثر دما و ساعات تابش آفتاب انتخاب شده است

[1] Rhino6
[2] Grasshopper Plugin
[3] Radiation Analysis
[4] Daylight Simulation
[5] Ladybug Plugin
[6] Honeybee Plugin



شکل۶- دما و ساعات تابش در اقلیم شیراز (Shiraz Climate, n.d.)

بنابراین روز ۱۰ ام ماه مرداد از فصل تابستان از ساعت ۸ تا ۱۶ برای تحلیل نور روز و انرژی تابشی انتخاب شده است. شکل۷، سمت چپ، نشان دهندهی مسیر حرکت خورشید در شیراز است و تصویر راست نشان دهندهی همان مسیر در ماه مرداد میباشد.



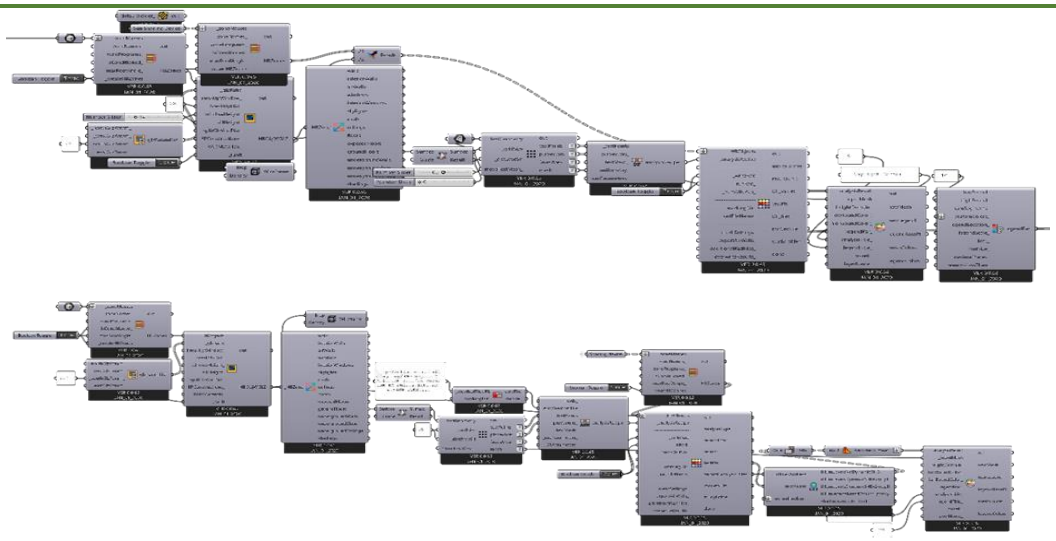
شکل۷- به ترتیب از چپ به راست نشان دهندهی مسیر حرکت خورشید در شیراز و ماه مرداد (منبع: نگارندگان)

بحث و ارائه یافتهها

بخش تحلیل یافتههای پژوهش حاضر به شبیهسازی پوستهی نما پرداخته است. به این صورت که در ابتدا، الگوی حرکتی گل میمون توسط نرمافزار راینو۶ و افزونهی گرسهاپر جهت مدلسازی پوسته، الگوریتم نویسی شده و در نهایت توسط افزونه هانیبی تحلیل درصد نور روز وارد شده به فضای داخلی ساختمان و توسط افزونهی لیدیباگ، درصد انرژی تابشی جذب شده توسط سطح شفاف نمای ساختمان بدست آمده است. ساختمان فرض شده در پژوهش حاضر با ابعاد ۱۰ در ۱۰ متر و ارتفاع ۱۴ متر به صورت مکعب مستطیل در نظر گرفته شده است. بنابراین ابعاد سطح بررسی شده جهت دریافت نور روز، ۱۰ در ۱۰ متر و ابعاد سطح شفاف نمای جنوبی ساختمان، ۱۰ در ۱۴ متر میباشد. لازم به ذکر است که ابعاد انتخاب شده، دلیل خاصی نداشته و صرفا ابعاد فرضی جهت انجام تحلیلهای مربوط به پژوهش میباشد، بنابراین سایر پژوهشگران و یا طراحان، میتوانند این ابعاد را متناسب با تحقیق و پروژهی خود، تنظیم و تغییر دهند.

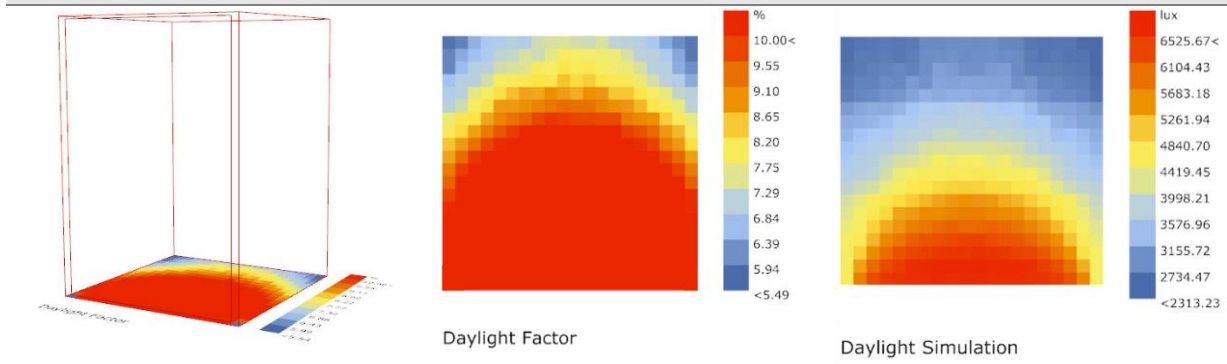
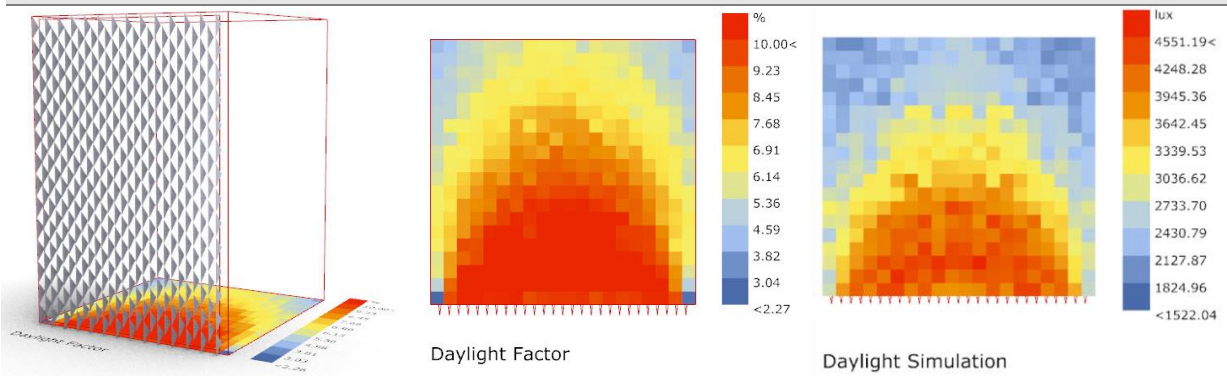
تحلیل نور روز

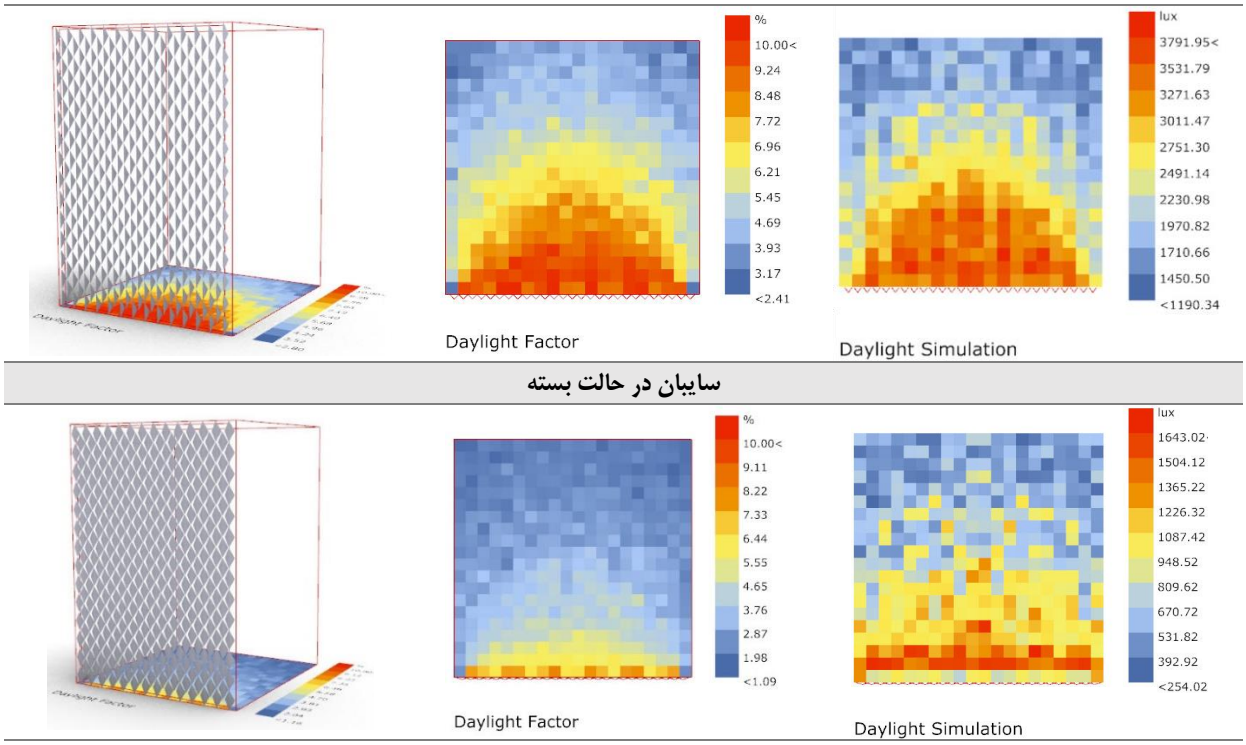
در این قسمت شبیهسازی درصد ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان و روشنایی فضای داخلی با واحد لوکس با افزونهی هانیبی انجام گرفته است که دارای یک الگوریتم مشخص میباشد و با وارد کردن زون حرارتی، مشخص کردن ابعاد بازشو و دادههای آب و هوایی شیراز و غیره، اطلاعات نهایی به صورت کمی و کیفی بدست میآید. در ادامه شکل۸، قرار دارد که نشان دهندهی الگوریتم تحلیل نور روز میباشد.



شکل۸- الگوریتم تحلیل نور روز به درصد (شکل بالا) و با واحد لوکس (شکل پایین) توسط افزونه‌ی هانی‌بی (منبع: نگارندگان)

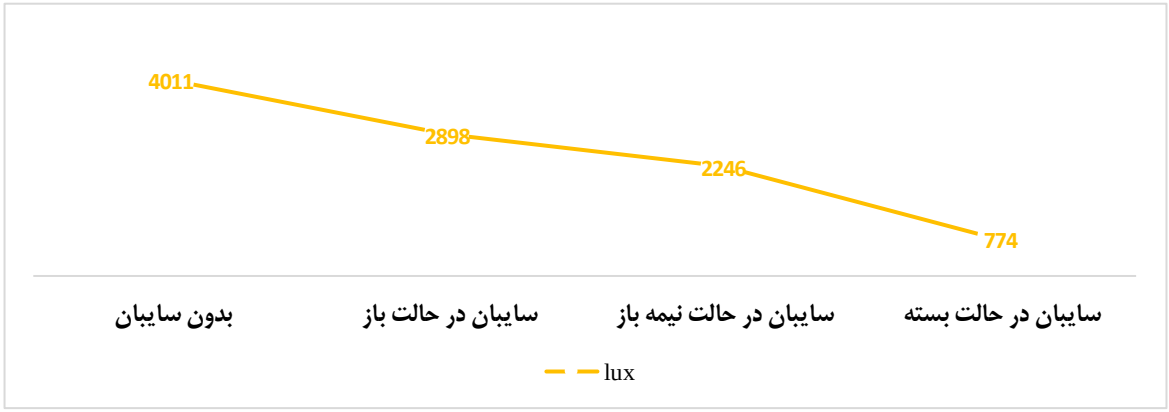
داده‌های بدست آمده از الگوریتم درصد ورود نور روز و میزان روشنایی فضای داخلی با واحد لوکس با ماهیت کمی و کیفی است که در ادامه نتایج به صورت کیفی مطرح شده است. به این صورت که به ترتیب از چپ به راست، پرسپکتیو از زون حرارتی، پلان درصد ورود نور روز به درصد و روشنایی فضای داخلی با واحد لوکس مطرح شده است.

نما بدون سایبان

سایبان در حالت باز

سایبان در حالت نیمه‌باز



شکل۹- تحلیل کیفی نور روز وارد شده به فضای داخلی ساختمان با واحد لوکس و درصد در اقلیم شیراز (منبع: نگارندگان)

نتایج حاصله از شکل۹، حاکی از آن است که فضای داخلی در حالت نما با سایبان باز دارای ۲۸۹۸ لوکس روشنایی و در حالت سایبان با پنل‌های نیمه‌باز ۲۲۴۶ لوکس روشنایی و در حالت سایبان با پنل‌های بسته ۷۷۴ لوکس روشنایی دریافت می‌کند. باتوجه به اینکه روشنایی فضاهای داخلی متناسب با نوع کاربری هر فضا متفاوت است، در پژوهش حاضر ۲۰۰ تا ۵۰۰ لوکس به عنوان میانگین حداقل و حداکثر روشنایی فضا در نظر گرفته شده و با در نظر گرفتن این بازه، سایبان در حالت مختلف روشنایی مورد نیاز کاربران را فراهم کرده و بهره‌گیری از نور مصنوعی را کاهش می‌دهد. همین امر باعث کاهش مصرف انرژی ساختمان می‌شود و نشان دهنده‌ی عملکرد مطلوب سایبان در زمینه‌ی کنترل ورود نور روز با حفظ روشنایی مطلوب و کاهش خیرگی و آسایش بصری کاربران است. در ادامه شکل۱۰، قرار دارد که نشان دهنده‌ی روشنایی فضای داخلی در حالت‌های مختلف سایبان نما با واحد لوکس است.



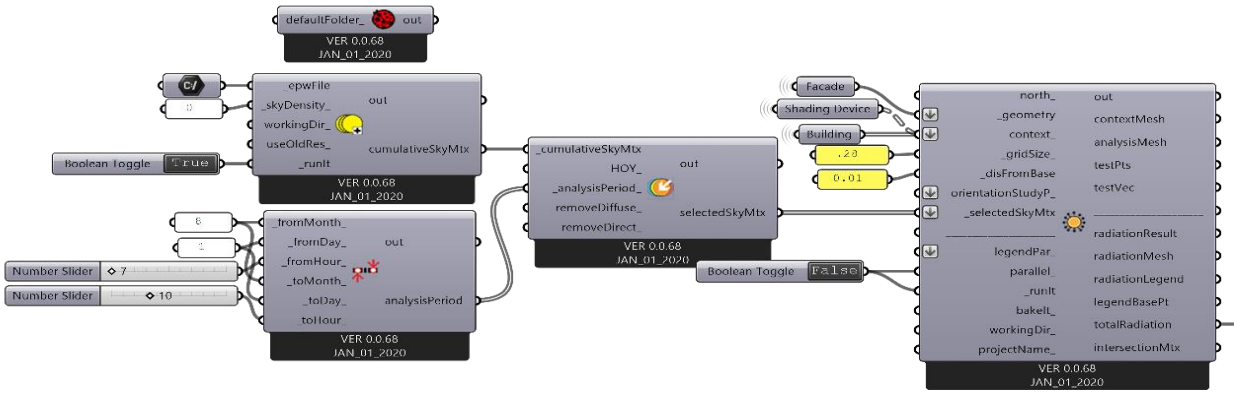
شکل۱۰- درصد ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان در اقلیم شیراز (منبع: نگارندگان)

نتایج حاصله از شکل۱۰، حاکی از آن است که سایبان در حالت باز، می‌تواند عملکرد مناسبی برای فصول سرد سال داشته باشد. زیرا با کنترل ورود نور روز و کاهش خیرگی، می‌تواند روشنایی و کاهش بار گرمایش را به همراه داشته باشد. علاوه بر آن، سایبان در حالت نیمه‌باز

برای فصول گرم سال دارای عملکرد مطلوب است که در ساعات تابش زیاد خورشید با زاویه‌ی مایل مانند ۱۲ تا ۱۴ پنل‌های سایبان جهت کاهش خیرگی و دمای فضای داخل و بار سرمایشی می‌تواند در حالت بسته قرار گیرد. درنهایت لازم به ذکر است که سایبان در حالت باز ۳۳ درصد، در حالت بسته ۷۵ درصد و در حالت نیمه باز ۴۴ درصد از میزان ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان کاسته و دارای بازده عملکردی بالا در راستای کنترل ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان دارد.

تحلیل انرژی تابشی

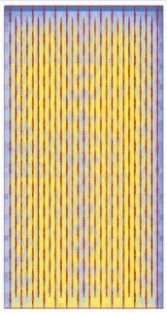
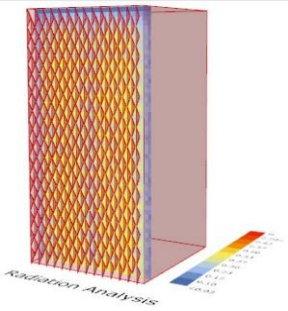
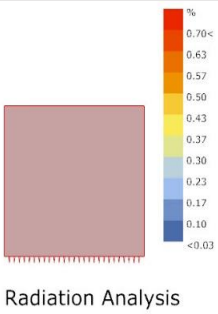
در این بخش برای تحلیل انرژی تابشی از افزونه‌ی لیدی‌باگ بهره گرفته شده است. به این صورت که با الگوریتم نویسی تحلیل انرژی تابشی مانند شکل۱۱، داده‌هایی مانند جداره‌های زون حرارتی، سطح شفاف نمای ساختمان و پوسته‌ی متحرک به همراه فایل اطلاعات آب و هوایی و غیره به الگوریتم داده شده و اطلاعات به صورت کمی و کیفی بدست آمده است.



شکل۱۱- الگوریتم تحلیل انرژی تابشی جذب شده توسط سطح شفاف نمای ساختمان در اقلیم شیراز (منبع: نگارندگان)

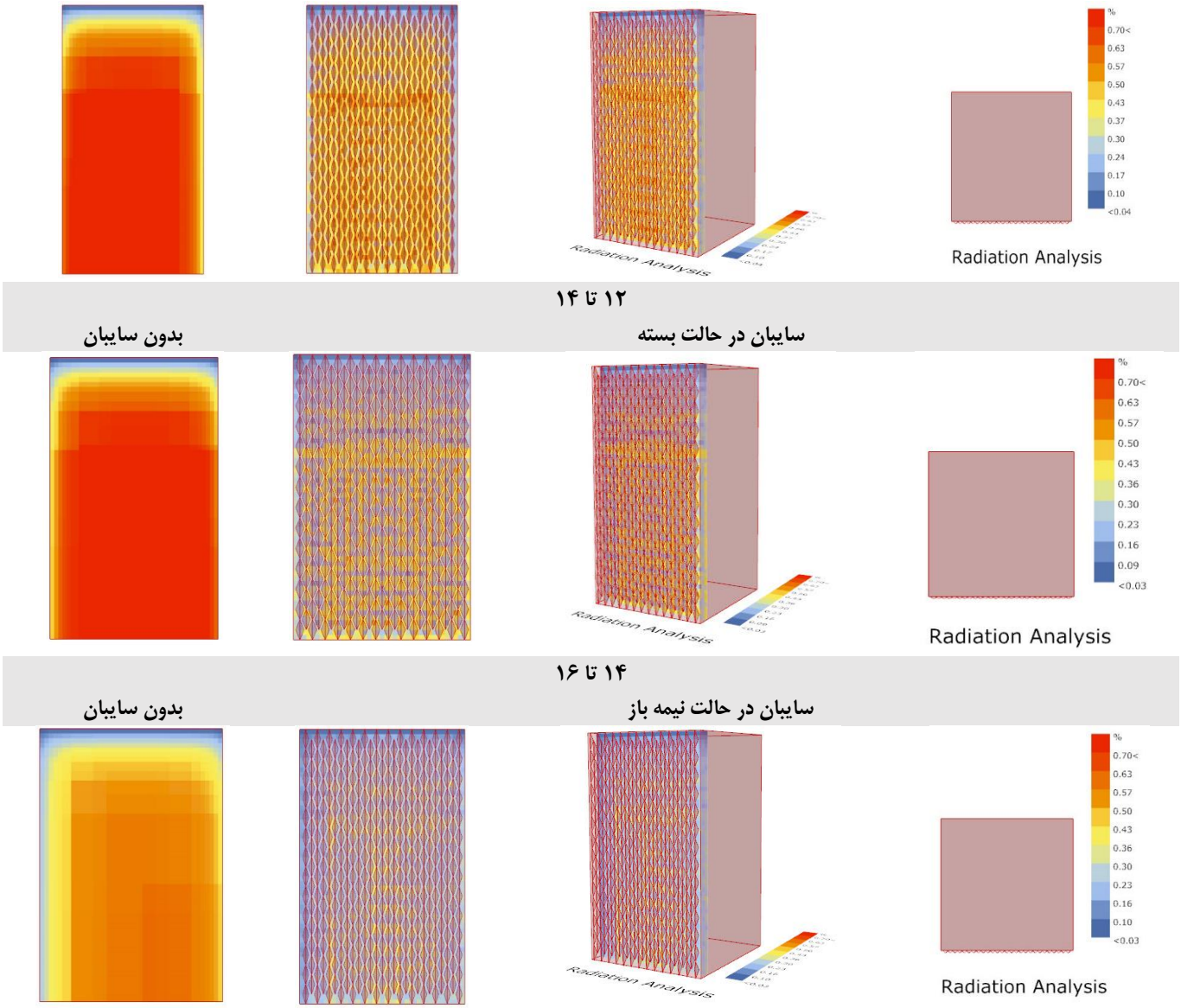
بنابراین در ادامه داده‌های بدست آمده به صورت کیفی مطرح شده است. به این صورت که از چپ به راست به ترتیب انرژی تابشی جذب شده توسط سطح شفاف نمای ساختمان بدون سایبان، با سایبان در حالت پرسپکتیو و پلان نشان داده شد است. لازم به ذکر است که پوسته‌ی نما از ساعت ۸ تا ۱۰ در حالت پنل‌ها به صورت باز، در ساعت ۱۰ تا ۱۲ در حالت نیمه‌باز، در حالت ۱۲ تا ۱۴ که بیشترین تابش خورشید را به همراه دارد در حالت بسته و در نهایت از ساعت ۱۴ تا ۱۶ در حالت نیمه‌باز قرار دارد. از ساعت ۱۶ به بعد که تابش آفتاب کاهش پیدا می‌کند تا ساعت ۱۰ صبح روز بعد، سایبان می‌تواند در حالت باز قرار گیرد.

۸ تا ۱۰

بدون سایبان		سایبان در حالت باز	
			

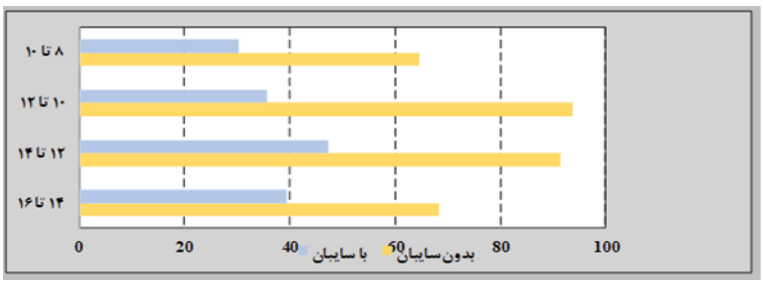
۱۰ تا ۱۲

بدون سایبان	سایبان در حالت نیمه باز



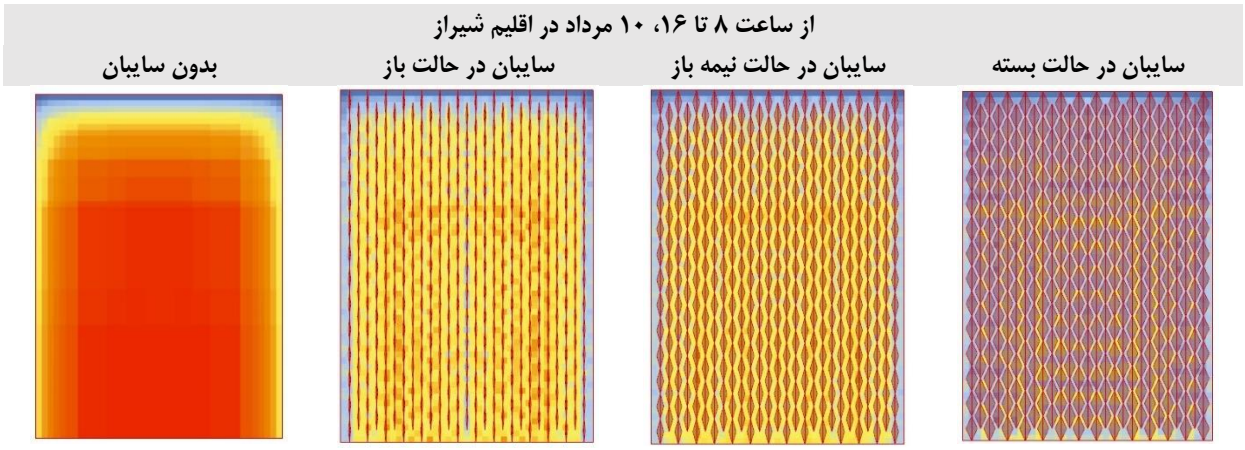
شکل۱۲- درصد جذب انرژی تابشی توسط سطح شفاف نمای ساختمان در حالت با و بدون سایبان در اقلیم شیراز (منبع: نگارندگان)

نتایج حاصل از شکل۱۲، حاکی از آن است که سایبان در تمام حالات پنل‌ها توانسته عملکرد مطلوبی ارائه دهد و طیف رنگی نمای ساختمان از رنگ قرمز و نارنجی به زرد تبدیل شده است. در ادامه شکل۱۳، قرار دارد که نشان دهنده‌ی مقایسه‌ی درصد جذب انرژی تابشی توسط سطح شفاف نمای ساختمان در ساعت‌ها و حالت‌های مختلف سایبان است.



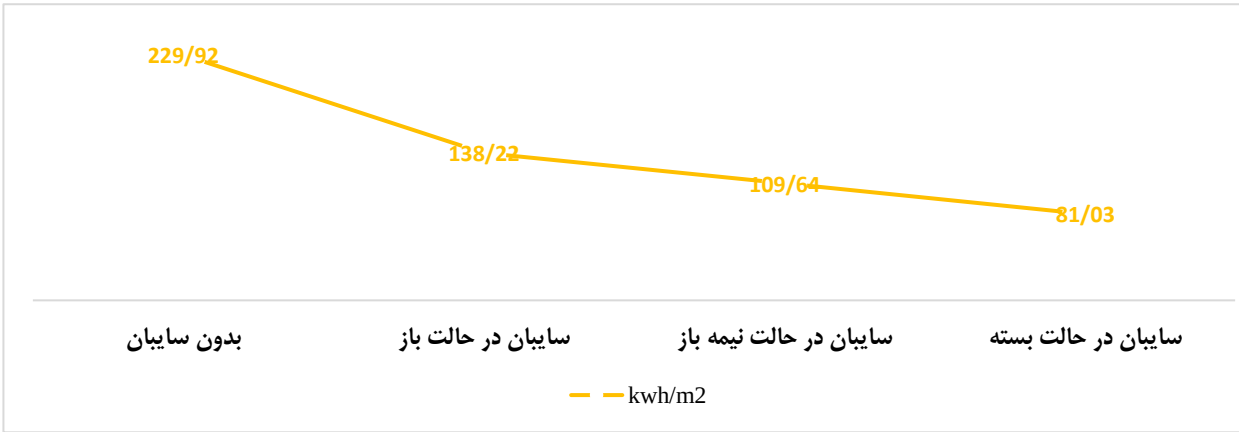
شکل۱۳- مقایسه‌ی درصد جذب انرژی تابشی توسط سطح شفاف نمای ساختمان در حالت با و بدون سایبان در اقلیم شیراز (منبع: نگارندگان)

باتوجه به اینکه مقایسه‌ی بالا در حالت‌های مختلف سایبان و بازه زمانی‌های متفاوت انجام شده است، بنابراین برای مقایسه‌ی حالت‌های مختلف سایبان، بازه‌ی زمانی ۸ تا ۱۶، ۱۰ مردادماه به صورت مشابه انتخاب شده که در ادامه در شکل۱۴، نشان داده شده است.



شکل۱۴- مقایسه‌های حالت‌های مختلف سایبان با حالت بدون سایبان (منبع: نگارندگان)

نتایج حاصل از شکل۱۴، حاکی از آن است که سایبان در حالت باز برای فصول سرد سال و در حالت نیمه‌باز و بسته برای فصول گرم سال دارای عملکرد مطلوب است. در ادامه انرژی جذب شده توسط سطح نمای ساختمان در حالت‌های مختلف شکل۱۵، به صورت کمی مطرح شده است.

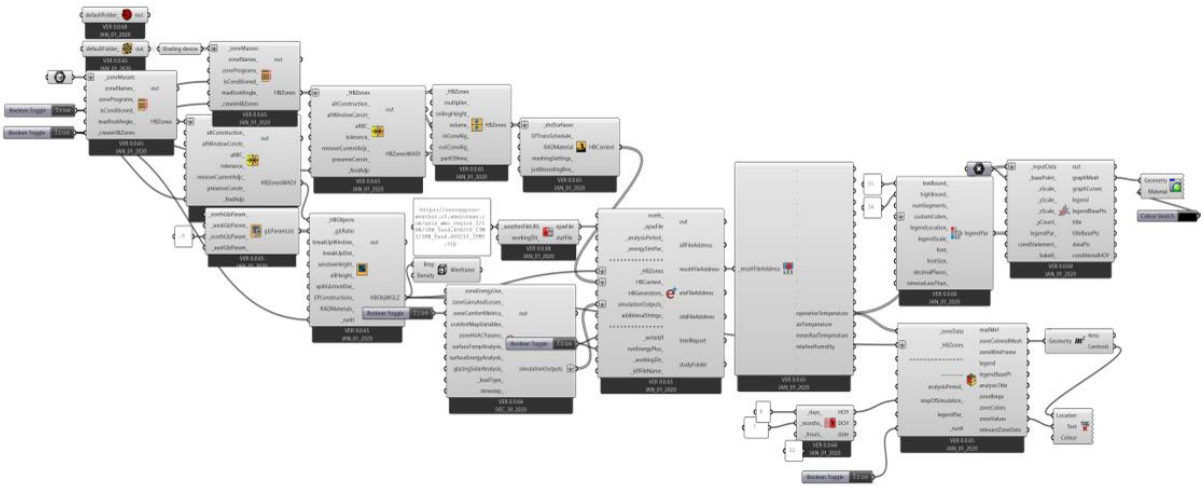


شکل۱۵- انرژی تابشی جذب شده توسط سطح شفاف نمای ساختمان در حالت‌های مختلف سایبان (منبع: نگارندگان)

باتوجه به شکل۱۵، می‌توان نتیجه گرفت که سایبان در حالت باز ۳۹ درصد، در حالت نیمه‌باز، ۵۲ درصد و در حالت بسته ۸۱ درصد از انرژی جذب شده توسط سطح شفاف نمای ساختمان کاسته و دارای عملکرد مطلوب در اقلیم گرم و نیمه خشک شیراز در راستای کنترل نور روز فضای داخلی ساختمان است.

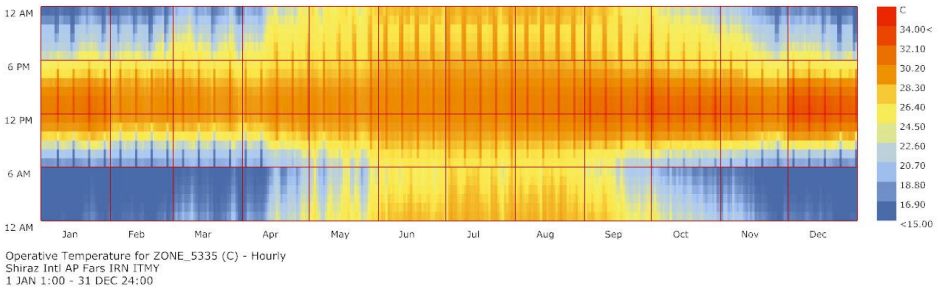
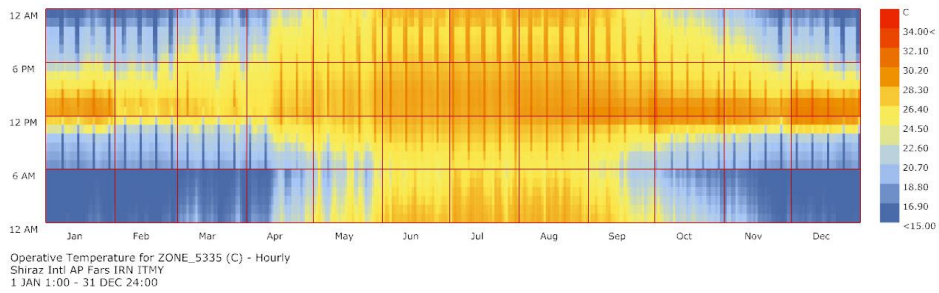
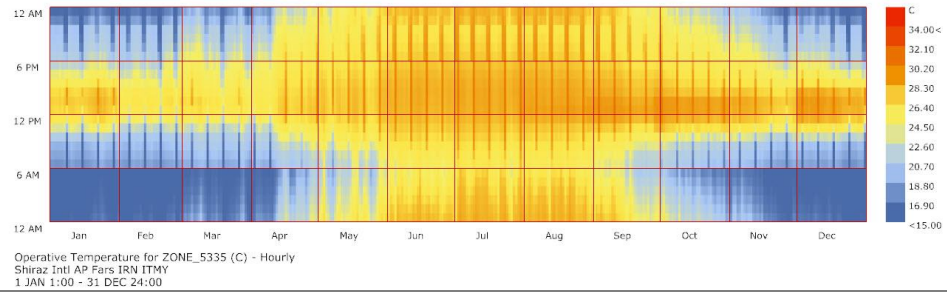
تحلیل دما

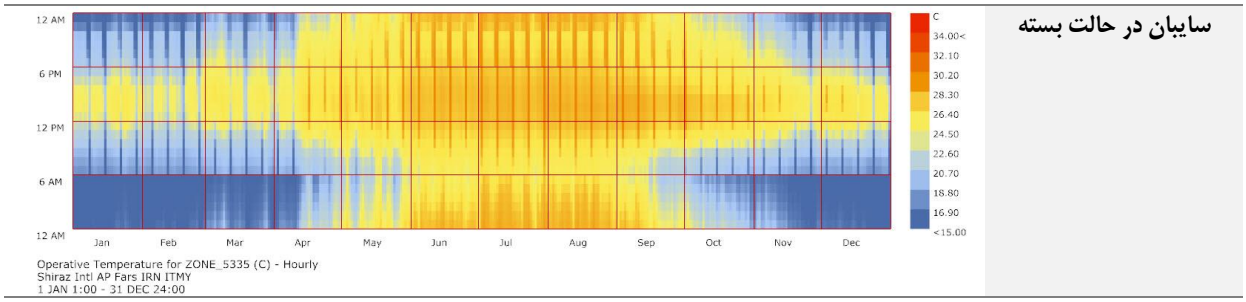
باتوجه به تحلیل‌های صورت گرفته سایبان در حالت بسته ۸۰ درصد از انرژی تابشی جذب شده توسط سطح شفاف نمای ساختمان را کاسته و به دنبال آن ۷۵ درصد از نور روز وارد شده به فضای داخلی ساختمان کاهش یافته است. بنابراین در این بخش میزان کاهش دمای فضای داخلی ساختمان توسط افزونه‌ی هانی‌بی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه الگوریتم تحلیل دما مطرح شده که با وارد کردن اطلاعات آب و هوایی شیراز، زون حرارتی، سایبان و غیره، تحلیل‌ها انجام شده است.



شکل۱۶- الگوریتم تحلیل دمای فضای داخلی (منبع: نگارندگان)

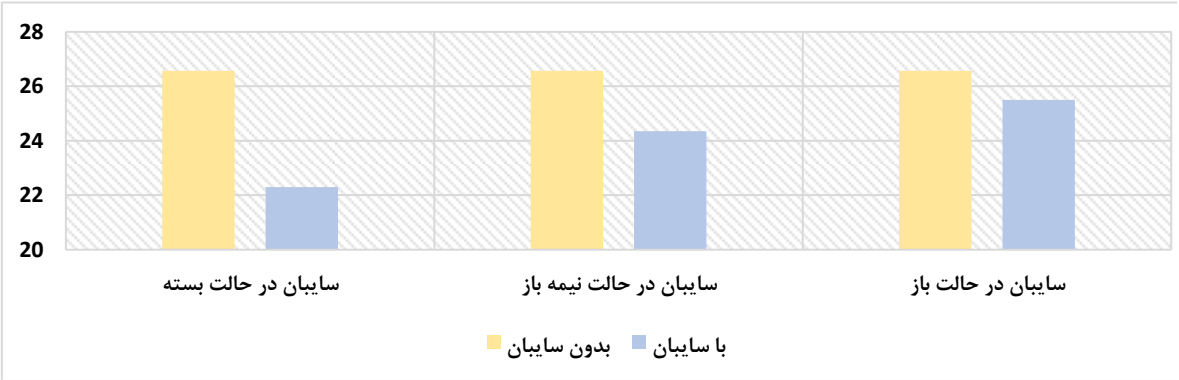
داده‌های بدست آمده از الگوریتم تحلیل دمای فضای داخلی به صورت کیفی (نمودارهای سایکرومتریک) و کمی مورد تحلیل قرار گرفته است. در این تحلیل، بازه زمانی خاصی به الگوریتم داده نشده و نمودارها در طول کل سال در حالت بدون سایبان و حالت با سایبان با هم مقایسه شده است.

بدون سایبان	
سایبان در حالت باز	
سایبان در حالت نیمه باز	



شکل۱۷- نمودارهای سایکرومتریک در حالت‌های مختلف با و بدون سایبان نما (منبع: نگارندگان)

باتوجه به شکل۱۷، در فصل تابستان و بازه زمانی ۱۲ تا ۱۴ ظهر دمای فضای داخلی ۳۲ درجه است. بنابراین نمای جنوبی ساختمان در اقلیم شیراز نیازمند سایبان جهت کنترل ورود نور روز به فضای داخلی و کاهش دما است. نتایج حاصل از نمودارهای سایکرومتریک حاکی از آن است که سایبان در حالت پنل‌های باز تا ۴ درصد، در حالت پنل‌های نیمه‌باز ۸ درصد و در حالت پنل‌های بسته تا ۱۶ درصد باعث کاهش دمای فضای داخلی ساختمان می‌شود. همین امر موجب کاهش بار سرمایش در فصول گرم سال شده و به دنبال آن، کاهش مصرف انرژی حاصل می‌شود. در ادامه شکل۱۸ قرار دارد که نشان دهنده‌ی مقایسه‌ی میزان کاهش دمای فضای داخلی در طول سال و با حالت‌های مختلف سایبان نما است.



شکل۱۸- دمای فضای داخلی به درجه سانتی‌گراد براساس سایبان نما در حالت‌های مختلف (منبع: نگارندگان)

همانطور که در شکل۱۸، نشان داده شده، نمای ساختمان با سایبان در حالت باز تا ۴درصد، سایبان در حالت نیمه باز ۸ درصد و سایبان در حالت بسته ۱۶ درصد از دمای فضای داخلی ساختمان می‌کاهد. همین امر نشان دهنده‌ی عملکرد مطلوب سایبان در اقلیم شیراز در راستای کنترل ورود نور روز به فضای داخلی و در نهایت کاهش دما و بار سرمایش است.

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

امروزه جهت رسیدن به معماری پاسخگو و سازگار با شرایط پیرامون، به خصوص برای طراحی پوسته‌های ساختمانی هوشمند از اعضای صلب و مفاصل مکانیکی بهره گرفته شده است. باوجود اینکه این شیوه دارای مزایای زیادی است، اما به دنبال آن یکسری پیامد منفی مانند هزینه‌ی بالای ساخت، تعمیر و نگهداری و غیره پدیدار می‌شود. بنابراین نیاز است که الگوهای انعطاف‌پذیر جهت طراحی استفاده شود تا مشکلات مطرح شده، کاسته شود. هدف از انجام پژوهش حاضر، طراحی پوسته‌ی هوشمند ساختمان با بهره‌گیری از الگوی طبیعی است که در این بخش الگوی حرکتی گل میمون به عنوان منبع الهام مکانیزم حرکتی پوسته‌ی ساختمان انتخاب شده است. علاوه بر آن، اقلیم شیراز (گرم و نیمه خشک) به دلیل داشتن تابستان‌های گرم با تابش شدید آفتاب، به عنوان اقلیم تحلیل عملکرد پوسته برگزیده شده است. به نظر می‌رسد که پوسته‌ی الهام گرفته شده از الگوی حرکتی گل میمون بتواند عملکرد مناسبی در کاهش ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان و جذب انرژی تابشی توسط سطح شفاف نمای ساختمان داشته باشد. بنابراین روش پژوهش مدلسازی-شبیه‌سازی انتخاب شده تا با نرم‌افزار راینو ۶ و افزونه‌ی گرس‌هاپر الگوی حرکتی گل میمون به الگوریتم حرکتی پوسته‌ی نما تبدیل شده و با افزونه هانی‌بی تحلیل نور روز و با افزونه‌ی لیدی‌باگ، تحلیل انرژی تابشی پوسته انجام شود. نتایج حاصله حاکی از آن است که پوسته‌ی طراحی شده در اقلیم شیراز، ماه

مرداد از ساعت ۸ تا ۱۶ در روز ۱۰ام می‌تواند در حالت پنل‌های باز تا ۳۳ درصد و در حالت پنل‌های نیمه‌باز تا ۴۴ درصد و در حالت پنل‌های بسته تا ۷۵ درصد از ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان کاسته و در حالت باز ۳۹ درصد، در حالت نیمه‌باز ۵۲ درصد و در حالت بسته ۶۴ درصد از انرژی تابشی جذب شده توسط سطح شفاف نمای ساختمان کم کند. همین امر باعث کاهش ۴ درصدی دمای فضای داخلی با سایبان در حالت باز، ۸ درصد سایبان با پنل‌های نیمه‌باز و ۱۶ درصد سایبان در حالت بسته شده است. در نتیجه پوسته‌ی طراحی شده دارای عملکرد مطلوبی در زمینه‌ی کنترل ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان است. پوسته‌ی حاضر به صورت پارامتریک طراحی شده و با تغییر یک مولفه، کل پوسته باز و بسته می‌شود. به همین دلیل پژوهشگران و طراحان می‌توانند از این پوسته متناسب با مسیر حرکت خورشید و اقلیم انتخابی تحقیق و پروژه‌ی خود بهره گیرند. در نهایت این پوسته دارای خصوصیت انعطاف‌پذیری است و پویا و پایدار می‌باشد. لازم به ذکر است که این پوسته به گونه‌ای طراحی شده تا با ساختار تغییرپذیر پاسخگوی نیاز کاربران باشد و به تغییرات محیط پیرامون، واکنش نشان دهد. نکته حائز اهمیت دیگر این است که پوسته به صورت مدولی طراحی شده و با ایجاد آسیب به یک بخش، سایر بخش‌ها می‌توانند به فعالیت خود ادامه دهند. بنابراین از نظر تولید، اجرا و نگهداری اقتصادی بوده و دارای عملکرد مطلوب است. علاوه بر آن خاصیت مدولی بودن پوسته این امکان را فراهم می‌کند تا پوسته متناسب با سطح مورد نیاز جهت پوشش یا هندسه‌ی انتخابی توسط طراحان، گسترش‌پذیر باشد. همچنین در کل می‌توان بیان کرد که بهره‌گیری از ساختارهای تغییرپذیری در طراحی متحرک می‌تواند مشکلات موجود در حالت سیستم‌های مکانیکی را کاسته و طرحی با بازده عملکردی بالا ارائه کند. پژوهشگران در آینده می‌توانند برای ایده‌های ارائه شده، سازه‌ی اجرایی طراحی کنند و یا این فرآیند طراحی پوسته را با بررسی سایر الگوهای گیاهی، تکمیل کنند.

References

1. Abodollahzadeh, S. M., Heidari, S., & Einifar, A. (2021). The investigation of thermal adaptation in apartments in hot and dry climate: A study on thermal comfort and thermal behavior in apartments in Shiraz. Naqshejahan- Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 11(3). [in Persian]
2. Ahmadnejad Karimi, M., & Haghparast, F. (2012.). Membrane opening and closing and expandable roofs: An adaptable approach to a sustainable and flexible architecture. First National Conference on Sustainable Construction. Mashhad Municipality Press. Mashhad.[in Persian].
3. Asefi, M., Sami, Z., & Mahmoudi, R. (2015). Scissor-like folding arm awning inspired by functional geometry. International Congress of Contemporary Civil Engineering, Dubai.[in Persian]
4. Bano, F., & Sehgal, V. (2019). Finding the gaps and methodology of passive features of building envelope optimization and its requirement for office buildings in India. Thermal Science and Engineering Progress, 9, 66–93.
5. Behnava, B., & Pourzargar, M. (2021). Impact of New Materials on Dynamics of Four Recent Decades in Iranian Architecture 1980-2020. Naqshejahan-Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 11(3), 49–66. [in Persian]
6. Charpentier, V., Hannequart, P., Adriaenssens, S., Baverel, O., Viglino, E., & Eisenman, S. (2017). Kinematic amplification strategies in plants and engineering. Smart Materials and Structures, 26(6), 63002.
7. ElGhazi, Y., Hamza, N., & Dade-Robertson, M. (2017). Responsive plant-inspired skins: A review. 33rd International Conference Passive Low Energy Architecture PLEA 2017, 3, 3636–3643.
8. Elkhayat, Y. O. (2014). Interactive movement in kinetic architecture. JES. Journal of Engineering Sciences, 42(3), 816–845.
9. Hafizi, N., & Karimnezhad, M. (2022). Biomimetic architecture towards bio inspired adaptive envelopes: in case of plant inspired concept generation. International Journal of Built Environment and Sustainability, 9(1), 1–10.
10. Heidari, A., Taghipour, M., & Yarmahmoodi, Z. (2021). The Effect of Fixed External Shading Devices on Daylighting and Thermal Comfort in Residential Building. Journal of Daylighting, 8(2), 165–180.

11. Jafarian, S., Sarkardehee, E., Monsefi Parapari, D., & Mojahedi, M. (2021). Investigating the effect of Flexible Lightweight Membrane Canopy in Order to Provide Thermal Comfort in Hot and Dry Climate. Journal of Sustainable Architecture and Urban Design, 9(2), 47–64. [in Persian]

12. Kamarian, M., & Sadeghpour, A. (n.d.). Analysis and evaluation of various movement mechanisms in deformable structures. Third International Conference on Applied Research in Structural Engineering and Construction Management. Sharif University.[in Persian]

13. Karamirad, S., & Vakilinezhad, R. (2022). Assessing the Effect of Green Roofs on Urban Microclimate, Case study: the Low-Rise Context in Hot-Dry Climate of Shiraz. Journal of Iranian Architecture & Urbanism (JIAU), 13(2), 5–19. [in Persian]

14. Keshtkaran, P., Movahed, K., & Barzegar, Z. (2022). Roof Optimization of Three Floor Residential Building Using GA Case Study: Shiraz, Iran. Journal of Sustainable Architecture and Urban Design, 10(1), 141–167.

15. Knippers, J., & Speck, T. (2012). Design and construction principles in nature and architecture. Bioinspiration \& Biomimetics, 7 1, 15002.

16. Li, S., & Wang, K. W. (2016). Plant-inspired adaptive structures and materials for morphing and actuation: a review. Bioinspiration & Biomimetics, 12(1), 11001.

17. Matini, M.-R. (2007). Biegsame Konstruktionen in der Architektur auf der Basis bionischer Prinzipien.

18. Matini, M., & Kakouee, E. (2019). Compliant Mechanisms; an Approach Leading to Functional Deficiencies Reduction in Kinetic Skins. Honar-Ha-Ye-Ziba: Memary Va Shahrsazi, 24(2), 39–48. [in Persian]

19. Matini, M R, & Knippers, J. (2008). Application of “abstract formal patterns” for translating natural principles into the design of new deployable structures in architecture. Design and Nature IV, 147–156.

20. Matini, Mohammad Reza. (2015). Pliable Convertible Structures in Architecture Inspired by Natural Role Models. 20(1), 67–80. [in Persian]

21. Megahed, N. A. (2017). Understanding kinetic architecture: typology, classification, and design strategy. Architectural Engineering and Design Management, 13(2), 130–146.

22. Moghani Rahimi, B., & Porbar, Z. (2013). Climate and architecture of Shiraz. Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 22(87), 64–67.

23. Molaei, M. M., Pilechiha, P., Zarrinmehr, Z., & Shaeri, J. (2020). The Impact of the Combination of Positive and Negative Spaces on the Performance of Solar Chimney; Case Study: Office Buildings in the Hot and Dry Climate of Shiraz. Armanshahr Architecture & Urban Development, 13(31), 157–167. [in Persian]

24. Nasr, T., & Yarmahmoodi, Z. (2022). Comparison of the Fixed External Sun Shading Devices Performance in order to Daylight Control (Case Study: Southern Facade in Yazd Climate). Journal of Environmental Science and Technology. 24(5), 33-45. [in Persian]

25. Nasr, T., Yarmahmoodi, Z., & Ahmadi, S. M. (2020). The Effect of Kinetic Shell’s Geometry on Energy Efficiency Optimization Inspired by Kinetic Algorithm of Mimosa pudic. Naqshejahan-Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 10(3), 219–230. [in Persian]

26. Razazi, S., Mozaffari Ghadikolaei, F., & Rostami, R. (2022). The effect of external and internal shading devices on energy consumption and co2 emissions of residential buildings in temperate climate. Space Ontology International Journal, 11(1), 75–89. https://doi.org/10.22094/soij.2022.1950918.1476

27. Sadeghpour, A. H., & Yavari, N. (2022). Analysis of dynamic mechanisms in building facades. Journal of Renewable and New Energy, 9(2), 101–112. [in Persian]

28. Shiraz Climate. (n.d.). Retrieved May 28, 2023, from https://www.weather-atlas.com/en/iran/shiraz-climate

29. Tabares-Velasco, P. C., Christensen, C., & Bianchi, M. (2012). Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. Building and Environment, 54, 186–196.

30. Yarmahmoodi, Z., Nasr, T., & Moztarzadeh, H. (2023). Algorithmic Design of Building Intelligent Facade to Control the Daylight Inspired by the Rafflesia Flower Kinetic Pattern. Naqshejahan-Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 1–24. [in Persian]