

Elucidating the Role of Building Materials in Energy Management in Hot and Dry Climates

Zahra Setayesh Khah¹, Javad Divandari², Ghanbar Ali Sheikhzadeh^{3*}

¹ Faculty of Architecture and Energy, Research Institute for Energy, Water and Environment, University of Kashan, Kashan, Iran, z.setayeshkhah@grad.kashanu.ac.ir

² Faculty of Architecture and Art, Department of Architecture, University of Kashan, Kashan, Iran, j.divandari@kashanu.ac.ir

³ Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran sheikhz@kashanu.ac.ir

Keywords:

energy optimization, optimized materials, energy simulation, hot and dry climate, welfare service complex.

Abstract: Energy consumption optimization in buildings particularly in hot and dry climates, is a key approach to achieving sustainable architecture. This study aims to quantitatively evaluate the impact of passive design strategies on reducing energy use in the welfare service complex of the University of Kashan. The research method is based on modeling and simulating the building's energy performance, using DesignBuilder software and the EnergyPlus calculation engine. Several parameters—including the initial building form, plinth height, window frames and glazing types, shading device dimensions—were examined based on Iran's National Building Regulations (Part 19) and the thermal material properties of exterior/interior walls and roofs. Input data included local EPW climatic conditions, material thermal transmittances, and space occupancy patterns with annual energy performance simulated in terms of kWh/m² year. The quantitative results indicated that among the initial geometrical configurations, the square form exhibited the optimum performance with an energy consumption of 267.22 kWh/m² year. Furthermore, the integration of combined horizontal and vertical shading devices, with a 100 cm depth, achieved a significant cooling load reduction, lowering the consumption to 189.75 kWh/m² year. Regarding the building envelope, incorporating light-colored stone, with glass wool insulation in exterior walls, and a cool white reflective coating on the roof improved thermal performance by 9.91% and 8.27%, respectively. Ultimately, the concurrent implementation of these passive strategies successfully decreased the annual energy demand from the initial 267.22 kWh/m² year to the optimized 167.81 kWh/m² year, resulting in an overall 37.20% reduction. These findings highlight the vital role of climate-responsive principles in enhancing the energy efficiency of institutional buildings in arid zones.

Original Research Article

Paper History:

Received: 2026/04/19

Revise: 2026/06/05

Accepted: 2026/06/27

How to cite this article: Z, Setayesh Khah, J, Divandari, Gh, Sheikhzadeh, "Elucidating the Role of Building Materials in Energy Management in Hot and Dry Climates", Energy Engineering and Management, Vol. 15, No. 4, PP. 1- 18, 2026.
<https://doi.org/10.22052/EEM.2026.258559.1171>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license.(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Introduction

Buildings are among the largest energy consumers worldwide, and improving their thermal performance has become a major concern in sustainable designs. In hot and dry climates, where intense solar radiation, low humidity, and large day–night temperature variations characterize the environment, the energy demand for cooling and overall thermal conditioning is particularly high. In such contexts, passive design strategies and the careful selection of building materials can significantly reduce energy consumption without increasing reliance on mechanical systems. Traditional architecture in Iran offers valuable lessons in climate-responsive design through compact forms, shaded openings, thermally appropriate envelopes, and reflective surfaces. However, these principles are not always systematically integrated into contemporary institutional buildings.

This study investigates the role of materials and passive design measures in energy management for the welfare service complex of the University of Kashan, located in a hot and dry climatic region. The research aims to identify the most effective design and material solutions for reducing annual energy demand while maintaining appropriate thermal performance. By evaluating building form, shading devices, glazing systems, frame materials, roof and wall assemblies, and interior partitions, the study provides a comprehensive assessment of how envelope decisions influence energy use in the university service building.

Materials and Methods

A simulation-based approach was adopted to analyze the energy performance of the proposed building. The climatic conditions of Kashan were examined using the local weather file and climate analysis tools to determine the dominant environmental characteristics and the requirements for passive solar control. A three-dimensional model of the building was developed in DesignBuilder, and dynamic thermal simulations were performed through EnergyPlus. To ensure the reliability of the modeling process, the simulation setup was validated using ASHRAE Standard 140, Case 600. The benchmark comparison indicated acceptable agreement between the simulated and reference results, confirming the validity of the analytical framework.

The building was simulated under realistic operational conditions, including occupancy schedules corresponding to the university working hours, internal gains from lighting and equipment, infiltration rates, and heating and cooling setpoints suitable for institutional use. The study, then, examined several design alternatives in sequence. These included comparisons among different building forms with equal floor area, variations in plinth height, selection of window frame materials, different glazing types, shading configurations based on solar geometry, and alternative wall, roof, and partition assemblies. The main performance indicator was annual energy consumption expressed in kWh/m² year. The analysis was conducted to determine which combination of passive strategies could most effectively reduce energy demand in the hot and dry climate of Kashan.

Research Results

The simulation results showed that building form had a measurable effect on annual energy use. Among the tested forms, the square plan performed best because of its compact geometry and more favorable surface-to-volume ratio. Although the differences among forms were not extreme, the square layout reduced thermal exchange with the exterior more effectively than the rectangular and circular alternatives. This confirmed the importance of compactness in reducing building energy demand in arid climates.

The evaluation of plinth height indicated that a slight elevation above ground could contribute to improved energy performance. Increasing the height of the building base resulted in a marginal reduction in annual energy use, suggesting that reducing direct thermal interaction with the ground can be beneficial, even if the effect is limited.

Window frame materials also influenced the performance, although the differences were relatively small. Among the studied options, aluminum frames without thermal break performed slightly better in the simulation, but overall the frame type was less influential than other envelope components. In contrast, the glazing system produced more noticeable differences. Double glazing with air as the filling gas, combined with a suitable window-to-wall ratio, achieved better annual performance than more complex alternatives such as triple glazing with argon. This outcome indicates that in a

climate like Kashan, minimizing heat losses alone is not sufficient; the balance between insulation and useful solar gain must also be considered.

Shading devices proved to be one of the most effective passive strategies. The combined horizontal and vertical shading system with a depth of 100 cm significantly reduced solar heat gain and lowered cooling loads. This result highlights the importance of orientation-specific façade protection in hot and dry regions, where direct solar radiation is a dominant source of thermal stress. Compared with simpler shading arrangements, the combined shading system offered a more balanced and efficient solution for managing solar exposure across different façade orientations.

The material composition of the external wall also had a substantial effect on energy performance. The best-performing wall assembly included a light-colored exterior finish, insulation, brick, and interior gypsum plaster. This combination reduced heat transfer through the wall and helped maintain a more stable indoor temperature. Similarly, the roof assembly had a strong influence on the results as the roof is directly exposed to intense solar radiation in Kashan. The most effective roof system included gypsum, a composite layer, XPS insulation, and a white reflective coating. The reflective outer surface reduced solar absorption, while the insulation improved thermal resistance.

The interior wall assembly was also optimized in the final stage of the analysis. The best option consisted of hollow brick, rock wool, and gypsum plaster. When all selected strategies were combined, the annual energy demand of the building decreased from 267.22 to 167.81 kWh/m².year. This represents a total reduction of 37.2%, which is a significant improvement in the energy performance of the proposed complex. The results demonstrate that the cumulative effect of multiple passive measures is much greater than the impact of any single intervention alone.

Discussion and Conclusions

The findings of this study confirmed that passive design strategies and material selection played a decisive role in improving the energy performance of buildings in hot and dry climates. The results showed that energy efficiency

depended on the integrated behavior of form, envelope, glazing, shading, and thermal mass than on isolated design elements. A compact square form reduced exposure to the external environment and supported a more efficient thermal response. At the same time, the substantial effect of shading devices revealed that solar control was one of the most critical design priorities in Kashan's climate.

The study also demonstrated that envelope materials must be selected according to local climatic logic. In particular, the best glazing solution was not necessarily the one with the highest insulating capability, but the one that balanced thermal resistance with solar gain. Likewise, the strong performance of light-colored and reflective roof and wall surfaces confirmed the value of reducing solar absorption in hot regions. These findings are consistent with the principles of climate-responsive architecture and show that modern simulation tools can effectively quantify their performance.

From a practical perspective, the reduction of annual energy use by 37.2% has important implications for the university and institutional buildings. Lower energy demand means reduced operating costs, improved environmental performance, and lower emissions associated with building operation. The proposed strategies are also feasible from an architectural standpoint and can be applied in the design of similar buildings in arid regions. Therefore, the study provides both technical evidence and design guidance for architects, engineers, and planners seeking to improve building performance in hot and dry climates.

In conclusion, the research shows that the careful selection of materials and passive design measures can substantially improve energy management in the university service building in Kashan. The combined application of a compact form, optimized glazing, effective shading, insulated and reflective envelope assemblies, and suitable interior partitions reduced the building's energy consumption from 267.22 to 167.81 kWh/m².year. This result highlights the importance of integrated passive design in sustainable building practice and supports its use as a practical strategy for energy-efficient development in hot and dry regions.

تبیین نقش مصالح در مدیریت انرژی ساختمان در اقلیم گرم و خشک (مطالعه موردی: طرح خدمات رفاهی دانشگاه کاشان)

زهرا ستایش خواه^۱، جواد دیوانداری^۲، قنبرعلی شیخزاده^{۳*}

^۱ کارشناسی ارشد معماری و انرژی، پژوهشکده انرژی، آب و محیط زیست، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

z.setayeshkhah@grad.kashanu.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده معماری و هنر گروه مهندسی معماری، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، j.divandari@kashanu.ac.ir

^۳ استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، sheikhz@kashanu.ac.ir

چکیده: بهینه سازی مصرف انرژی در ساختمان ها، به ویژه در اقلیم های گرم و خشک،

از مهم ترین رویکردهای دستیابی به معماری پایدار به شمار می رود. هدف این پژوهش بررسی و تحلیل کمی تأثیر راهکارهای طراحی غیرفعال بر کاهش مصرف انرژی در مجموعه خدمات رفاهی دانشگاه کاشان است. روش تحقیق مبتنی بر مدل سازی و شبیه سازی عملکرد انرژی ساختمان با استفاده از نرم افزار شبیه ساز پایگاه طراحی و

مجموعه خدمات رفاهی

موتور محاسباتی انرژی پلاس بوده است. در این پژوهش پارامترهای فرم اولیه، ارتفاع

مقاله علمی پژوهشی

کرسی چینی، مصالح قاب و نوع شیشه پنجره ها، عمق و زوایای سایبان ها بر اساس

مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان، مصالح دیوارهای خارجی و داخلی و سقف بام

موردبررسی قرار گرفتند. داده های ورودی شامل شرایط اقلیمی شهر کاشان (فایل

داده های آب و هوایی استاندارد)، مشخصات حرارتی مصالح و الگوی بهره برداری

فضایی بوده و عملکرد سالانه برحسب کیلووات ساعت بر مترمربع در سال شبیه سازی

گردید. نتایج شبیه سازی نشان داد که در میان فرم های اولیه، فرم مربع با مصرف

۲۶۷/۲۲ کیلووات ساعت بر مترمربع بیشترین کارایی را دارد. همچنین، به کارگیری

سایبان های ترکیبی (افقی و عمودی) با عمق ۱۰۰ سانتی متر سهم بسزایی در کاهش بار

سرمایشی ایفا کرده و مصرف را به ۱۸۹/۷۵ کیلووات ساعت بر مترمربع رساند. در

بخش پوسته نیز استفاده از ترکیب سنگ روشن و عایق پشم شیشه در دیوارهای

خارجی و پوشش بازتاب دهنده سفید در بام، به ترتیب منجر به بهبود ۹/۹۱ و ۸/۲۷

درصدی عملکرد حرارتی شدند. در نهایت، اعمال هم زمان این تدابیر غیرفعال، مصرف

سالانه کل ساختمان را از حالت اولیه (۲۶۷/۲۲ کیلووات ساعت بر مترمربع) به حالت

بهینه (۱۶۷/۸۱ کیلووات ساعت بر مترمربع) کاهش داد که این امر منجر به کاهش کل

۳۷/۲ درصدی مصرف انرژی سالانه ساختمان نسبت به حالت مبنا گردید. این دستاورد

پتانسیل بالای طراحی اقلیمی را در کاهش وابستگی مجموعه های دانشگاهی به

سیستم های فعال مکانیکی اثبات می کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶

۱. مقدمه

[۱۱-۱۰]. علاوه بر مصالح، تدابیر سستی نظیر بهره‌گیری از ظرفیت سرمایشی خاک و فضاهای زیرزمینی، افزایش ضخامت پوسته خارجی و به‌کارگیری مصالح با ظرفیت حرارتی بالا، در کنترل نوسانات دمایی داخلی، نقشی کلیدی داشته‌اند [۱۱]. سایر راهکارهای اقلیمی شامل طراحی حیاط مرکزی، ایجاد فضاهای واسطه و نیمه‌باز مانند ایوان و بالکن و استفاده از پوشش‌های خارجی روشن بوده است [۱۲-۱۳]. همچنین، عناصر معماری مانند سقف‌های چند پوسته، گنبدها و فضاهای فیلتر ورودی و وجود حوض آب و پوشش گیاهی در حیاط‌ها، در تنظیم شرایط محیطی داخلی بسیار مؤثر بوده‌اند [۱۴-۱۵].

پژوهش‌های متعددی به بررسی تأثیر طراحی اقلیمی و راهکارهای غیرفعال بر کاهش مصرف انرژی و بهبود آسایش حرارتی در ساختمان‌ها پرداخته‌اند و نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از عناصر معماری بومی و مصالح متناسب با شرایط اقلیمی می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها داشته باشد. با این حال، مطالعات جامعی که به بررسی هم‌زمان این راهکارها در طراحی مجموعه‌های خدماتی دانشگاهی در اقلیم گرم و خشک کاشان با استفاده از شبیه‌سازی انرژی پردازد، محدود است. از این‌رو، پژوهش حاضر باهدف بررسی و بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان‌های خدماتی در این اقلیم انجام شده است. باوجود ارزش علمی مطالعات پیشین، بخش عمده این پژوهش‌ها هر یک تنها بر برخی مؤلفه‌های مؤثر بر عملکرد انرژی، مانند مصالح، تهویه طبیعی، سایه‌اندازی یا فرم بنا تمرکز داشته‌اند و کمتر به بررسی هم‌زمان و یکپارچه این عوامل در ساختمان‌های خدماتی معاصر پرداخته‌اند. از این‌رو، ضرورت دارد نقش ترکیبی راهکارهای طراحی غیرفعال و انتخاب مصالح در یک نمونه واقعی و متناسب با شرایط اقلیمی گرم و خشک، به‌صورت دقیق‌تر ارزیابی شود.

۲. پیشینه پژوهش

تحقیقات گسترده‌ای به ارزیابی تأثیر متقابل عوامل طراحی بر عملکرد فضاهای معماری، شامل میزان انرژی مصرفی و سطح آسایش حرارتی و بصری، اختصاص یافته است [۱۶-۱۷]. مطالعات عمیقی در زمینه آسایش حرارتی و روش‌های طراحی اقلیمی در معماری سنتی ایران صورت گرفته است [۱۸]. این پژوهش‌ها به‌طور مشخص نشان می‌دهند که معماری بومی با تکیه بر اصول طراحی غیرفعال، نقشی مؤثر در کاهش نوسانات دمایی داخلی و فراهم آوردن شرایط مطلوب آسایش حرارتی ایفا

مسئله مصرف انرژی در ساختمان‌ها، به‌عنوان یک معضل حائز اهمیت زیست‌محیطی و اقتصادی، در کانون توجه جهانی قرار دارد. از آنجاکه بناهای تاریخی، برخلاف سازه‌های امروزی، فاقد تجهیزات مدرن بوده‌اند، ارزیابی علمی عملکرد حرارتی و سطح آسایش در آن‌ها برای دستیابی به راهکارهای بهینه‌سازی انرژی، امری ضروری است [۱]. در این راستا، بررسی فضاهای تاریخی که از ویژگی‌های معماری بومی و اقلیمی بهره برده‌اند، می‌تواند کلید ارائه راهکارهای طراحی پایدار در شرایط آب‌وهوایی مشابه باشد [۲]. تحلیل آسایش حرارتی فضاهای داخلی، معیار دقیقی برای سنجش کارایی این راهکارهای سنتی و امکان انطباق آن‌ها با معماری معاصر فراهم می‌آورد [۳]. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که اعمال ترکیبی از روش‌های سرمایشی و گرمایشی غیرفعال، نظیر سایه‌اندازی مناسب، تهویه طبیعی و گزینش مصالح ساختمانی کارآمد، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک، سهم بسزایی در ارتقا شرایط آسایش حرارتی دارد [۴-۵]. اگرچه تدابیر اقلیمی سنتی که از طریق آزمون‌وخطا توسط نسل‌های گذشته تکامل یافته بودند، به‌تدریج به فراموشی سپرده شدند [۲]، اما امروز، با تشدید پدیده گرمایش زمین، افزایش گازهای گلخانه‌ای و مصرف مفرط انرژی در بخش ساختمان، توجه معماران و طراحان مجدداً به این راهکارها معطوف شده و ارزش طراحی هماهنگ با اقلیم احیا گردیده است [۶]. مطالعات تطبیقی متعددی ثابت کرده‌اند که ساختمان‌های سنتی در اقلیم گرم و خشک، به دلیل سازگاری با محیط، نه‌تنها انرژی کمتری مصرف می‌کنند، بلکه سطح آسایش حرارتی مطلوب‌تری نسبت به نمونه‌های مدرن برای ساکنان فراهم می‌آورند [۷-۸]. به‌طور خاص، بررسی‌های صورت گرفته در ایران نیز تأکید دارد که انطباق طراحی با شرایط اقلیمی، عامل اصلی در دستیابی به شرایط حرارتی بهینه در خانه‌های سنتی بوده است [۹]. این در حالی است که ساختمان‌های امروزی برای رسیدن به آسایش مشابه، وابستگی شدیدی به سامانه‌های فنی و منابع انرژی بیرونی دارند [۵].

پژوهشگران همچنین تصدیق نموده‌اند که بسیاری از اصول معماری غیرفعال سنتی، قابلیت ادغام و استفاده در ساخت‌وسازهای نوین را دارا هستند [۱۰]. تحقیقات گسترده‌ای در مناطق گرم و خشک دنیا، به تحلیل این موضوع پرداخته‌اند؛ برای مثال، یک مطالعه بر اساس استاندارد اشری ۵۵، نقش مؤثر مصالح بومی نظیر آجر را در کاهش مصرف انرژی تأیید نموده است

می‌کند. در سطح جهانی نیز، تحقیقات متعددی نقش طراحی اقلیمی را در بهینه‌سازی شرایط حرارتی ساختمان‌ها موردبررسی قرار داده‌اند. این مطالعات بر کارایی راهکارهای غیرفعال نظیر تهویه طبیعی، سایه‌اندازی و استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا تأکید دارند و اثبات کرده‌اند که این روش‌ها به‌طور مؤثری در بناهای تاریخی ایران نیز پیاده‌سازی شده‌اند [۱۹]. بر اساس گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی^۱، ساختمان‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین بخش مصرف‌کننده انرژی در سطح جهان شناخته می‌شوند. به‌طور خاص، پوسته خارجی ساختمان‌ها سهم قابل‌توجهی در این مصرف دارد؛ به‌نحوی که در سال ۲۰۱۸، ۳۶٪ از کل انرژی مصرفی و ۳۹٪ از انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از این بخش بوده است [۲۰-۲۱]. این آمار نشان‌دهنده تأثیر مستقیم و حیاتی طراحی و اجرای ساختمان بر محیط‌زیست است.

بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها فرایندی چندوجهی است که به عواملی چون طراحی معماری، انتخاب مصالح مناسب، سیستم‌های مکانیکی، مدیریت انرژی و شرایط محیطی بستگی دارد. در این میان، پوسته ساختمان به‌عنوان مرز میان فضای داخلی و خارجی، نقش کانونی در عملکرد حرارتی بنا ایفا می‌کند. این جزء سازه‌ای نه‌تنها عامل اصلی دریافت انرژی خورشیدی است، بلکه در تنظیم دمای داخلی، کنترل آلودگی صوتی، تهویه و کارایی کلی ساختمان تأثیر مستقیم دارد [۲۲-۲۳].

در مناطق گرم و خشک، جهت‌گیری بناها در معماری بومی اغلب به سمت جنوب شرقی تنظیم می‌شد تا حداکثر بهره‌وری از گرمای خورشید در فصول سرد حاصل گردد. همچنین، اتخاذ رویکرد شهرسازی متراکم یکی از راهکارهای اقلیمی بود که به کاهش اتلاف حرارتی و حفظ انرژی کمک می‌کرد [۲۴].

در مطالعات جدید، اهمیت جزئیات طراحی فنی نیز تأیید شده است؛ برای مثال، پژوهش حیدری‌نژاد و همکاران نشان داد که تنظیم ارتفاع دریچه بازگشت هوا در فاصله ۱/۳ متری از کف، منجر به کاهش ۱۵/۳ درصدی مصرف انرژی و بهبود شرایط آسایش حرارتی می‌گردد [۲۵]. درزمینه تحلیل فضاهای شهری، پژوهش حسینی و همکاران به بررسی عددی تأثیر فرم بام و نسبت ارتفاع به عرض خیابان بر آسایش حرارتی فضاهای بازپرداخت و تأکید نمود که افزایش این نسبت با کاهش جریان باد و افت کیفیت هوا، آسایش حرارتی را کاهش می‌دهد [۲۶]. علیرغم وجود پیشینه‌ای غنی از تحقیقات در حوزه معماری پایدار،

ارزیابی دقیق شرایط مصرف انرژی در طراحی مجموعه‌های خدماتی دانشگاهی، به‌ویژه با بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی منطقه کاشان و مدل‌سازی انرژی، حوزه‌ای است که کمتر موردتوجه قرارگرفته است. ازاین‌رو، این پژوهش باهدف تحلیل پارامترهای انرژی در طرح پیشنهادی مجموعه خدمات رفاهی دانشگاه کاشان، تلاش می‌نماید تا با مقایسه نتایج با استانداردهای آسایش حرارتی، به درک عمیق‌تری از کارایی اقلیمی این طرح دست یابد و پیشنهادهایی کاربردی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در پروژه‌های مشابه ارائه نماید. باوجود تعدد پژوهش‌های انجام‌شده درزمینه طراحی اقلیمی، آسایش حرارتی و نقش مصالح در کاهش مصرف انرژی، اغلب مطالعات پیشین هر یک تنها بر یک یا چند عامل محدود، نظیر فرم بنا، نوع مصالح، تهویه طبیعی یا سایه‌اندازی تمرکز داشته‌اند. همچنین بخش قابل‌توجهی از این پژوهش‌ها بر بناهای مسکونی یا نمونه‌های تاریخی متمرکز بوده و بررسی یکپارچه و هم‌زمان پارامترهای مؤثر بر عملکرد انرژی در ساختمان‌های خدماتی دانشگاهی، به‌ویژه در اقلیم گرم و خشک کاشان، کمتر موردتوجه قرارگرفته است. ازاین‌رو، نوآوری پژوهش حاضر در آن است که با بهره‌گیری از شبیه‌سازی انرژی، مجموعه‌ای از متغیرهای مؤثر شامل فرم ساختمان، درصد و نوع بازشو، سایبان و مصالح اجزای پوسته را به‌صورت مرحله‌ای و یکپارچه مورد ارزیابی قرار داده و تأثیر نهایی آن‌ها را بر مصرف سالیانه انرژی در یک نمونه موردی واقعی بررسی می‌کند.

۳. روش تحقیق

این پژوهش با بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی انرژی در طرح پیشنهادی مجموعه خدمات رفاهی دانشگاه کاشان انجام‌شده است. به‌منظور دستیابی به‌دقت بالا در مدل‌سازی، تمامی اطلاعات مربوط به پلان‌ها، نماها، ابعاد بازشوها و مصالح پیشنهادی طرح بر اساس داده‌های طراحی معماری و اصول متداول ساخت در اقلیم کاشان گردآوری گردید. نقشه‌ها و اطلاعات معماری مورداستفاده، با استناد به ضوابط فنی و استانداردهای طراحی پایدار تنظیم‌شده و به‌طور کامل با شرایط اقلیمی و نیازهای عملکردی مجموعه مطابقت دارند. داده‌های اقلیمی موردنیاز نیز در قالب فایل استاندارد ای‌پی‌دیلو^۲ از پایگاه اینترنتی وان بیلدینگ^۳ دریافت شده و در نرم‌افزار کلایمت

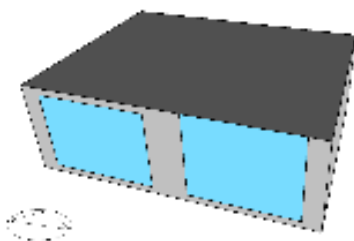
شرایط مرزی شامل استفاده از سیستم گرمایش و سرمایش ایده‌آل، نرخ نفوذ هوا مطابق مشخصات استاندارد و به‌کارگیری فایل آب‌وهوایی مرجع اعمال گردید. شبیه‌سازی با گام زمانی یک‌ساعته انجام شد تا شرایط مدل با الزامات استاندارد ۱۴۰ اشری مطابقت داشته باشد.

برای اعتبارسنجی، نتایج شبیه‌سازی با مقادیر مرجع رسمی اشری شامل بار سالانه گرمایش، بار سالانه سرمایش، پیک گرمایش و پیک سرمایش مقایسه شد. جدول (۱) اختلاف محاسبه‌شده بین نتایج شبیه‌سازی و مقادیر مرجع استاندارد را نشان می‌دهد که تمامی خروجی‌ها در بازه قابل‌قبول استاندارد اشری قرار دارند و اختلافات مشاهده‌شده کمتر از حدود مجاز تعیین‌شده در این استاندارد است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی انجام‌شده در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر از دقت کافی برخوردار بوده و قابلیت استفاده در تحلیل‌های بخش‌های بعدی پژوهش را دارد.

جدول (۱): مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مقادیر مرجع ۱۴۰ اشری -

کیس ۶۰۰

درصد خطا	اختلاف	مقدار شبیه‌سازی	مقدار مرجع اشری	شاخص
۲/۵٪	۰/۱۲	۴/۹۲	۴/۸۰	بار سالانه گرمایش (مگاوات ساعت) ^{۱۰}
۲٪	۰/۱۳	۶/۴۸	۶/۳۵	بار سالانه سرمایش (مگاوات ساعت) ^{۱۱}
۱/۸٪	۰/۰۶	۳/۳۱	۳/۲۵	اوج بار گرمایش (کیلووات) ^{۱۲}
۲/۱٪	۰/۰۷	۳/۳۴	۳/۲۷	اوج بار سرمایش (کیلووات) ^{۱۳}



$$8(X) / 6(Y) / 2/70(Z)$$

شکل (۱): کیس ۶۰۰

10. Annual Heating Load (MWh)
11. Annual Cooling Load (MWh)
12. Heating Peak (kW)
13. Cooling Peak (kW)

کانسولتنت^۱ جهت تحلیل شرایط اقلیمی شهر کاشان به کار گرفته شده است.

نتایج حاصل از تحلیل نمودارهای بیوکلیماتیک^۲، تعیین‌کننده شرایط آسایش حرارتی، الگوهای تابش، رطوبت نسبی، دما و تهویه طبیعی در منطقه بوده که در فرایند طراحی مدل انرژی و تعریف پارامترهای حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌سازی سه‌بعدی بنا در محیط نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر طراحی و با موتور تحلیل گر انرژی پلاس مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، فرایند مدل‌سازی هندسی و تعریف زون‌های حرارتی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر (نسخه ۳۷) انجام گرفته و تحلیل دینامیکی عملکرد انرژی با فراخوانی موتور محاسباتی انرژی پلاس (نسخه ۴۹) صورت پذیرفته است. همچنین از نرم‌افزار کلایمت کانسولتنت^۵ (نسخه ۶) جهت تحلیل داده‌های اقلیمی استفاده شده است. در فرایند شبیه‌سازی، الگوی بهره‌برداری فضایی برای بخش‌های اداری و خدماتی مطابق با ساعات کاری دانشگاه (۸ صبح الی ۱۶) تعریف گردید. بار حرارتی ناشی از روشنایی و تجهیزات برابر با ۵ وات بر مترمربع و نرخ نفوذ هوای خارجی^۶ به میزان ۷/۰ تعویض هوا در ساعت^۷ در نظر گرفته شد. همچنین دمای آسایش حرارتی^۸ برای سیستم‌های سرمایشی ۲۴ درجه سلسیوس و برای سیستم‌های گرمایشی ۲۰ درجه سلسیوس تنظیم گردید.

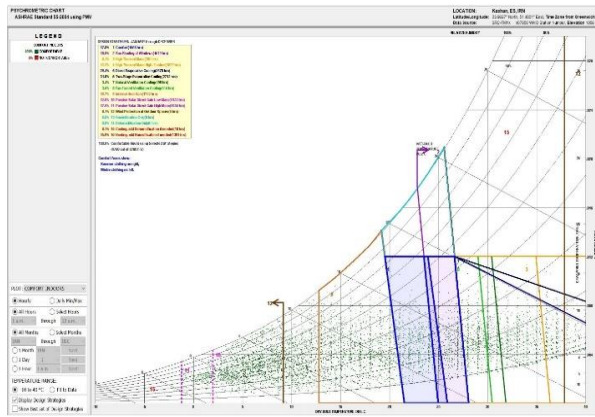
۴. اعتبار سنجی نرم‌افزار

برای اطمینان از دقت مدل‌سازی و صحت عملکرد نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، از روش استاندارد ارائه‌شده در استاندارد ۱۴۰ انجمن مهندسان گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا^۹ استفاده شد. شکل (۱) این استاندارد مجموعه‌ای از ساختمان‌های آزمون را تعریف می‌کند که نتایج شبیه‌سازی آن‌ها توسط چندین موتور محاسباتی معتبر تولید شده و به‌عنوان مقادیر مرجع ارائه شده‌اند. در این پژوهش، کیس ۶۰۰ که متعلق به دسته ساختمان‌های کم جرم (ساختمان‌های سبک) با پنجره دوجداره شفاف است، برای فرایند اعتبارسنجی انتخاب شد.

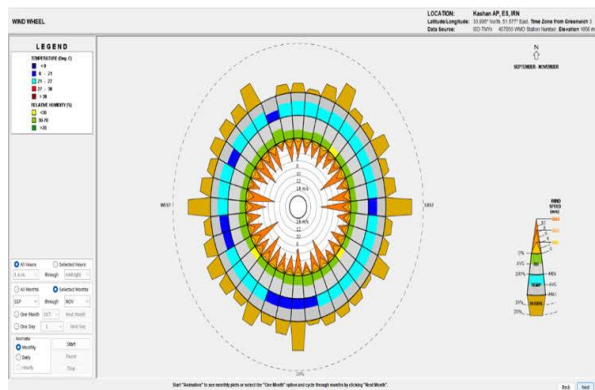
1. Climate Consultant
2. Bioclimatic
3. DesignBuilder v.7
4. EnergyPlus v.9.4
5. Climate Consultant
6. Infiltration
7. ACH
8. Set-point
9. ASHRAE Standard 140 – BESTEST

۵. تحلیل شرایط اقلیمی

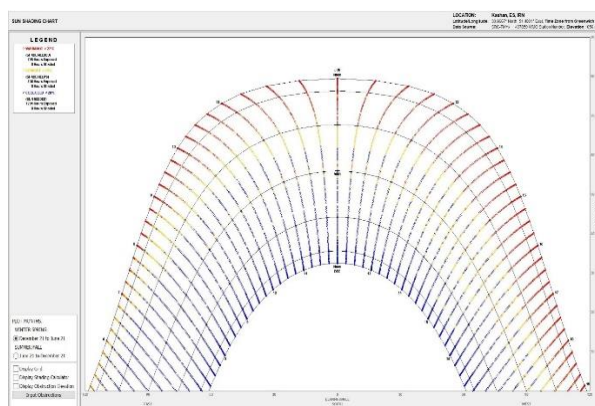
به منظور تحلیل شرایط اقلیمی تأثیرگذار بر مصرف انرژی و آسایش حرارتی در طرح پیشنهادی مجموعه خدمات رفاهی دانشگاه کاشان، داده‌های اقلیمی این شهر بر اساس استاندارد ای‌پی‌دبلیو و با تکیه بر شاخص‌های تعریف شده در استاندارد اشری استخراج و تحلیل گردید. جهت شناخت دقیق رفتار اقلیمی منطقه، سه نمودار تحلیلی کلیدی شامل نمودار سایکرومتریک (شکل ۲)، گلباد (شکل ۳) و نمودار سایه‌بانی خورشیدی (شکل ۴) تدوین شد.



شکل (۲): نمودار سایکرومتریک شهر کاشان



شکل (۳): گلباد شهر کاشان



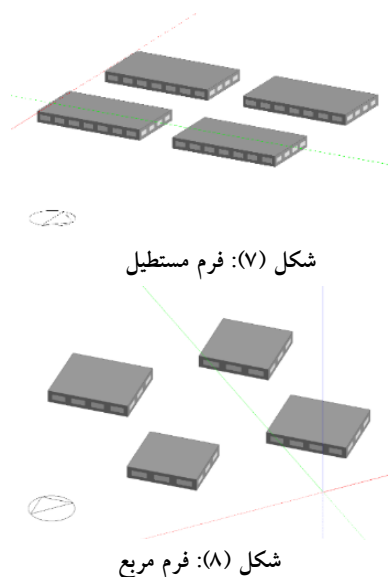
شکل (۴): نمودار سایه‌بانی خورشیدی شهر کاشان

بررسی نمودار سایکرومتریک (شکل ۲) نشان می‌دهد که اقلیم کاشان دارای نوسانات دمایی قابل توجهی است. در ماه‌های گرم سال (اردیبهشت تا شهریور)، شرایط اقلیمی برای بخش بزرگی از ساعات روز خارج از محدوده آسایش حرارتی قرار دارد که نشان‌دهنده نیاز مبرم به کنترل تابش خورشیدی است. در مقابل، نمودار سایه‌بانی خورشیدی (شکل ۴) زوایای تابش را در این ساعات بحرانی مشخص کرده و مبنای تعیین عمق و زوایای سایبان‌های افقی و عمودی در طرح پیشنهادی قرار گرفته است. همچنین، تحلیل گلباد (شکل ۳) نشان‌دهنده جهت بادهای غالب در فصول مختلف است. این داده در شبیه‌سازی انرژی به جهت بهره‌گیری از تهویه طبیعی در میان فصل‌ها (برای کاهش بار سرمایشی) و جلوگیری از نفوذ هوای گرم در تابستان مدنظر قرار گرفت. علاوه بر این، بررسی هم‌زمان دما و رطوبت (شکل ۲) نشان می‌دهد که رطوبت نسبی در کاشان پایین است؛ به‌ویژه در تابستان که با افت شدید رطوبت در ساعات گرم روز مواجه هستیم. این ویژگی اقلیمی، پتانسیل استفاده از راهکارهای سرمایش تبخیری در فضاهای نیمه‌باز را تأیید کرده و در مدل‌سازی انرژی برای بهبود عملکرد حرارتی مجموعه لحاظ شده است. با تلفیق این نمودارها، بستری علمی برای ارزیابی و بهینه‌سازی مصرف انرژی فراهم گردید تا عملکرد حرارتی مجموعه با دقت و واقع‌گرایی بیشتری مورد تحلیل قرار گیرد.

۶. پارامترهای مورد تحلیل در طراحی غیرفعال در اقلیم گرم و خشک و مشخصات مصالح پیشنهادی

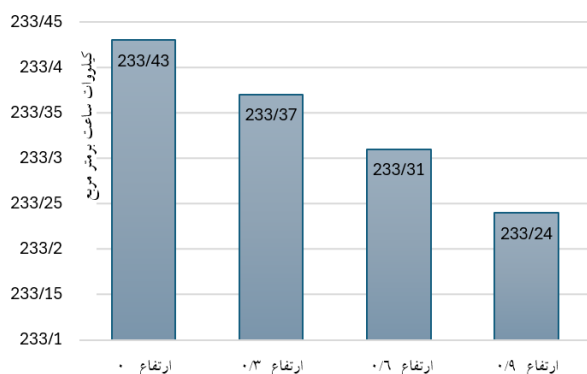
۱.۶. فرم اولیه

در طراحی مجموعه خدمات رفاهی دانشگاه کاشان، فرم اولیه ساختمان به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در بهینه‌سازی مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل هندسی ساختمان با تأثیر بر نحوه دریافت نور خورشید، تهویه طبیعی و توزیع



۲.۶. کرسی چینی

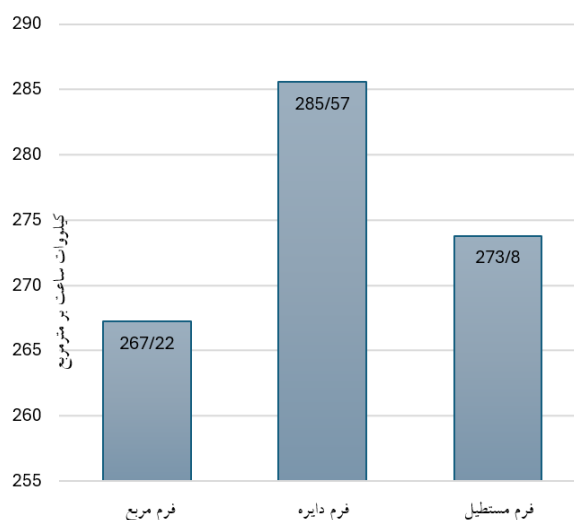
در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی در طرح موردنظر، یکی از عوامل کلیدی موردبررسی، تأثیر ارتفاع کرسی‌چینی بر مصرف انرژی ساختمان است. کرسی‌چینی به‌عنوان بخش مهمی از پی‌ریزی ساختمان، نقش بسزایی در عایق‌بندی حرارتی و کاهش اتلاف انرژی ایفا می‌کند. در این مطالعه، مصرف انرژی سالیانه برای ارتفاع‌های مختلف کرسی‌چینی مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مصرف انرژی برای کرسی‌چینی با ارتفاع ۰، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ متر به ترتیب برابر ۲۳۳/۳۷، ۲۳۳/۴۳، ۲۳۳/۳۱ و ۲۳۳/۲۴ کیلووات ساعت بر مترمربع محاسبه شده است.



شکل (۹): نمودار مصرف انرژی برای مقادیر مختلف ارتفاع کرسی چینی

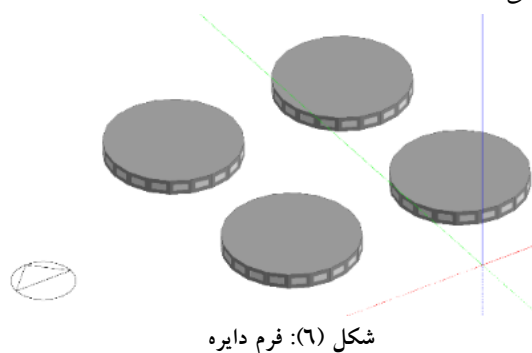
نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع کرسی‌چینی از ۰ متر به ۰/۹ متر، مصرف انرژی به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد. این کاهش، هرچند اندک (حدود ۰/۱۹ کیلووات ساعت بر مترمربع)، نشان‌دهنده تأثیر مثبت ارتفاع کرسی‌چینی بر بهبود عملکرد

حرارتی، نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی ایفا می‌کند. در این مطالعه، مصرف انرژی سالیانه برای فرم‌های اولیه مختلف با مساحت یکسان برای ساختمان ارزیابی شده است تصاویر ۵ و ۶ و ۷ و ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مصرف انرژی برای فرم‌های دایره، مربع و مستطیل به ترتیب برابر ۲۸۵/۵۷، ۲۶۷/۲۲ و ۲۷۳/۸ کیلووات ساعت بر مترمربع محاسبه شده است.



شکل (۱۰): نمودار مصرف انرژی برای فرم‌های اولیه

بنابراین فرم مربع با مصرف انرژی ۲۶۷/۲۲ کیلووات ساعت بر مترمربع، کمترین میزان مصرف انرژی را در مقایسه با سایر فرم‌ها ارائه می‌دهد. در مقابل، فرم دایره با ۲۸۵/۵۷ کیلووات ساعت بر مترمربع بالاترین مصرف انرژی را دارد. این تفاوت (حدود ۱۸/۳۵ کیلووات ساعت بر مترمربع بین فرم مربع و دایره) نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه فرم اولیه ساختمان بر کارایی انرژی است. فرم مربع به دلیل نسبت سطح به حجم کمتر و توزیع متعادل‌تر نور و گرما، عملکرد بهتری در کاهش مصرف انرژی نشان می‌دهد.



ساعت بر مترمربع)، در مقیاس بزرگتر و در طول عمر ساختمان می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر هزینه‌های انرژی داشته باشد.

بنابراین استفاده از قاب‌های پنجره آلومینیومی بدون شکست حرارتی در طرح موردنظر توصیه می‌شود. این انتخاب نه تنها به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند، بلکه با توجه به دوام و مقاومت بالای آلومینیوم، می‌تواند هزینه‌های نگهداری را نیز کاهش دهد. در کنار این، ترکیب این مصالح با شیشه‌های دوجداره و طراحی مناسب جهت‌گیری پنجره‌ها می‌تواند به بهبود عملکرد حرارتی و پایداری محیطی مجموعه کمک کند.

۴.۶. شیشه پنجره‌ها

علاوه بر نوع مصالح، نسبت مساحت پنجره به دیوار^۲ و مشخصات فنی بازشوها نقش تعیین‌کننده‌ای در بار حرارتی ساختمان ایفا می‌کنند. در این پژوهش، تأثیر تغییر درصد بازشوها در بازه ۱۵ تا ۳۰ درصد بر میزان مصرف انرژی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که با کاهش درصد بازشو، میزان اتلاف حرارتی و در نتیجه مصرف کل انرژی کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که کمترین میزان مصرف در حالت ۱۵ درصد بازشو مشاهده شد. با این حال، با در نظر گرفتن الزامات طراحی معماری، تأمین روشنایی مطلوب روز^۳ و هماهنگی با فرم بنا، نسبت ۲۵ درصد به‌عنوان حد بهینه در طراحی نهایی لحاظ گردید. پس از تثبیت نسبت بازشوها، انتخاب نوع شیشه و قاب پنجره‌ها جهت بهینه‌سازی نهایی موردبررسی قرار گرفت. شیشه‌های چند جداره با پرکننده‌های مختلف (گاز آرگون یا هوا) به دلیل خواص عایق‌بندی متفاوت، تأثیر مستقیمی بر تبادل حرارتی جداره‌ها دارند. میزان مصرف انرژی سالیانه برای انواع ترکیب‌های مختلف پنجره در شکل (۱۱) ارائه شده است. مطابق با یافته‌های شبیه‌سازی، میزان مصرف انرژی برای پنجره‌های دوجداره با گاز آرگون، دوجداره با هوا، سه جداره با گاز آرگون و سه جداره با هوا به ترتیب برابر ۲۱۴/۹۸، ۲۱۰/۵۷، ۲۱۷/۴۹ و ۲۱۶/۳۵ کیلووات ساعت بر مترمربع محاسبه گردید.

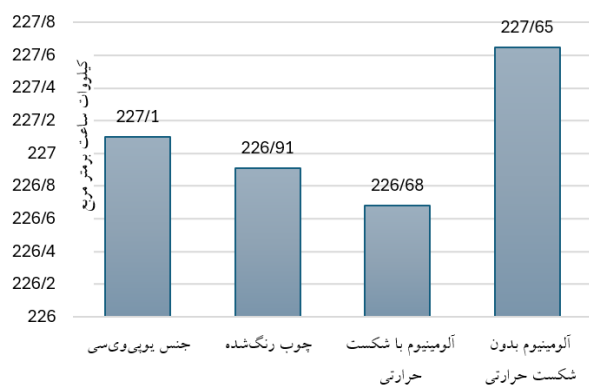
نتایج نشان می‌دهد که پنجره‌های دوجداره با پرکننده هوا با مصرف ۲۱۰/۵۷ کیلووات ساعت بر مترمربع، کارآمدترین عملکرد را در اقلیم کاشان از خود نشان می‌دهند. در مقابل، پنجره‌های سه جداره با گاز آرگون با مصرف ۲۱۷/۴۹ کیلووات ساعت بر مترمربع، بالاترین میزان مصرف را دارا هستند. این اختلاف

حرارتی ساختمان است. این کاهش می‌تواند به دلیل کاهش نفوذ حرارتی و بهبود عایق‌بندی در ارتفاع‌های بالاتر باشد.

بنابراین پیشنهاد می‌شود ارتفاع کرسی‌چینی در طرح موردنظر در حد ۰/۹ متر تنظیم شود تا ضمن حفظ پایداری سازه، مصرف انرژی بهینه‌تر گردد. این اقدام در کنار سایر راهکارهای بهینه‌سازی انرژی، مانند استفاده از مصالح با ضریب هدایت حرارتی پایین و طراحی مناسب پنجره‌ها، می‌تواند به کاهش قابل توجه هزینه‌های انرژی و ارتقای پایداری محیطی مجموعه کمک کند.

۳.۶. مصالح قاب پنجره‌ها

در طرح موردنظر، انتخاب مصالح مناسب برای قاب پنجره‌ها یکی از عوامل کلیدی در بهینه‌سازی مصرف انرژی است. مصالح مختلف به دلیل خواص حرارتی و عایق‌بندی متفاوت، تأثیر مستقیمی بر میزان مصرف انرژی ساختمان دارند. مصرف انرژی سالیانه برای انواع مصالح قاب پنجره‌ها بررسی شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مصرف انرژی برای انواع قاب پنجره با جنس یوپی‌وی‌سی^۱، چوب رنگ‌شده، آلومینیوم با شکست حرارتی و آلومینیوم بدون شکست حرارتی به ترتیب برابر ۲۲۶/۶۵، ۲۲۶/۶۸، ۲۲۶/۹۱ و ۲۲۷/۱ کیلووات ساعت بر مترمربع محاسبه شده است.



شکل (۱۰): نمودار مصرف انرژی برای مصالح مختلف قاب پنجره‌ها

باتوجه به نتایج، قاب پنجره ساخته شده از آلومینیوم بدون شکست حرارتی با مصرف انرژی ۲۲۶/۶۵ کیلووات ساعت بر مترمربع، کمترین میزان مصرف انرژی را در مقایسه با سایر مصالح دارد. در مقابل، قاب یوپی‌وی‌سی با ۲۲۷/۱ کیلووات ساعت بر مترمربع بالاترین مصرف انرژی را نشان می‌دهد. تفاوت مصرف انرژی بین مصالح مختلف، هرچند اندک (حدود ۰/۴۵ کیلووات

به شدت مورد تأکید است. در این مبحث، زوایای بهینه سایه اندازی برای ۲۱۶ شهر ایران ارائه شده که رعایت آن‌ها می‌تواند کنترل مؤثری بر میزان نور و گرمای ورودی خورشید داشته باشد. در این پژوهش، به منظور دستیابی به عملکرد حرارتی بهینه برای پروژه در شهر کاشان، با استناد به جداول مبحث ۱۹، زوایای سایبان‌های افقی و عمودی بر اساس جهت‌گیری پنجره‌ها استخراج و تحلیل شدند.



شکل (۱۲): نمای پنجره و سایبان‌های افقی و عمودی مبحث ۱۹

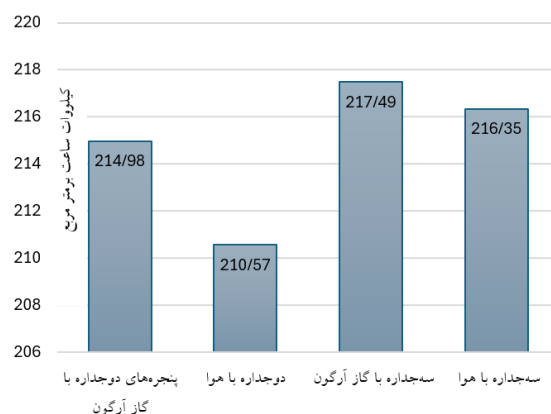
شکل (۱۳) نمودار نتایج شبیه‌سازی مصرف انرژی سالیانه نشان می‌دهد که عمق و نوع سایبان تأثیر مستقیمی بر عملکرد ساختمان دارد. به طوری که با به کارگیری سایبان‌های ترکیبی (افقی و عمودی) با عمق ۱۰۰ سانتی‌متر، مصرف انرژی به ۱۸۹/۷۵ کیلووات ساعت بر مترمربع کاهش یافته که در مقایسه با سایبان افقی ساده ۵۰ سانتی‌متری (۲۰۶/۲۶ کیلووات ساعت بر مترمربع)، بهبود قابل توجهی را نشان می‌دهد. با توجه به اقلیم گرم و خشک کاشان و بر اساس توصیه‌های مبحث ۱۹، جهت‌گیری صحیح و اعمال زوایای سایه اندازی به شرح زیر برای طراحی پیشنهاد می‌شود:

نماهای جنوبی و جنوب شرقی: با توجه به زوایای سایه در جدول (زاویه ۶۰ تا ۶۵ درجه)، استفاده از سایبان افقی با عمق محاسبه شده (حدود ۷۰ تا ۸۶ سانتی‌متر) جهت جلوگیری از تابش‌های مستقیم میان‌روز توصیه می‌گردد.

نماهای غربی و جنوب غربی: به دلیل ارتفاع کم خورشید در ساعات عصر، سایبان‌های افقی کارایی محدودی دارند؛ لذا مطابق با جداول مبحث ۱۹، استفاده از سایبان‌های عمودی (سایبان‌های متحرک) جهت کنترل تابش‌های جانبی الزامی است. در نهایت، جدول ۲ استفاده از راهکارهای ترکیبی (افقی و عمودی) با عمق ۱۰۰ سانتی‌متر، ضمن انطباق با ضوابط مبحث ۱۹، بهترین عملکرد را در کنترل گرمای خورشیدی و کاهش بار سرمایشی برای مجموعه خدمات رفاهی دانشگاه کاشان فراهم می‌آورد (شکل ۱۴).

عملکرد (معادل ۶/۹ کیلووات ساعت بر مترمربع بین بهترین و بدترین حالت) اهمیت انتخاب صحیح نوع شیشه را در کنار نسبت بازشوها دوچندان می‌کند؛ بنابراین، بر اساس تحلیل‌های انجام شده، استفاده از پنجره‌های دوجداره با پرکننده هوا در طرح پیشنهادی توصیه می‌شود. این انتخاب علاوه بر کاهش مصرف انرژی، از منظر اقتصادی نیز در مقایسه با گزینه‌های سه جداره مقرون به صرفه است. در نهایت، ترکیب این شیشه‌ها با قاب‌های آلومینیومی و رعایت نسبت بهینه ۲۵ درصد در بازشوها، منجر به بهبود چشمگیر عملکرد حرارتی و کاهش هزینه‌های انرژی در کل مجموعه خدمات رفاهی خواهد شد.

لازم به توضیح است که هرچند پنجره‌های سه جداره با گاز آرگون از نظر ضریب انتقال حرارت^۱ عایق بهتری محسوب می‌شوند، اما در اقلیم گرم و خشک کاشان که بخش قابل توجهی از نیاز گرمایشی در فصل سرد می‌تواند از طریق تابش خورشیدی جبران شود، کاهش ضریب کسب گرمای خورشیدی^۲ در شیشه‌های سه جداره باعث محدود شدن ورود گرمای مفید خورشید به داخل می‌گردد. در نتیجه، با وجود کاهش تلفات هدایتی، بار گرمایشی سالانه افزایش یافته و مصرف کل انرژی در تراز سالانه بیشتر مشاهده می‌شود؛ بنابراین انتخاب شیشه دوجداره با پرکننده هوا به دلیل ایجاد تعادل مناسب بین عایق‌بندی و دریافت گرمای خورشیدی، برای شرایط اقلیمی کاشان گزینه بهینه‌تری ارزیابی می‌شود.



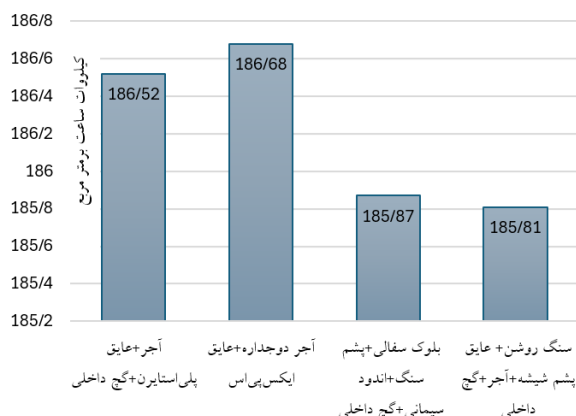
شکل (۱۱): نمودار مصرف انرژی برای شیشه‌های مختلف

۵.۶. سایبان‌ها

شکل (۱۲) استفاده از سایبان‌ها به عنوان یکی از راهکارهای اصلی کاهش بار سرمایشی، در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان [۲۷]

1. U-value
2. SHGC

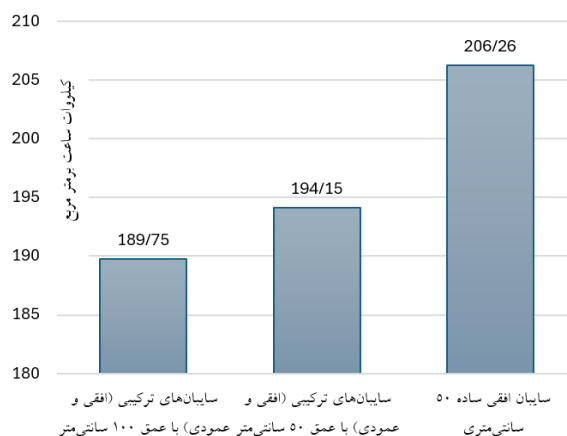
است. مصالح این دیوارهای خارجی با توجه به خواص عایق‌بندی حرارتی و توانایی کاهش اتلاف انرژی، تأثیر مستقیمی بر عملکرد انرژی ساختمان دارند. مصرف انرژی سالیانه برای ترکیب‌های مختلف مصالح دیوارهای خارجی ارزیابی شده است و نتایج در شکل (۱۵) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود مصرف انرژی برای مصالح مختلف شامل آجر+عایق پلی‌استایرن+ گچ داخلی، آجر دوجداره+ عایق ایکس‌پی‌اس^۱، بلوک سفالی+ پشم سنگ+ اندود سیمانی+ گچ داخلی و سنگ روشن+ عایق پشم‌شیشه+ آجر+ گچ داخلی به ترتیب برابر ۱۸۶/۶۸، ۱۸۶/۵۲، ۱۸۵/۸۷ و ۱۸۵/۸۱ کیلووات ساعت بر مترمربع محاسبه شده است.



شکل (۱۵): نمودار مصرف انرژی برای مصالح مختلف دیوارهای خارجی

نتایج نشان می‌دهد که ترکیب مصالح دیوار شامل سنگ روشن+ عایق پشم‌شیشه+ آجر+ گچ داخلی با مصرف انرژی ۱۸۵/۸۱ کیلووات ساعت بر مترمربع، کمترین میزان مصرف انرژی را در مقایسه با سایر گزینه‌ها ارائه می‌دهد (شکل ۱۶). در مقابل، ترکیب آجر دوجداره با عایق ایکس‌پی‌اس با ۱۸۶/۶۸ کیلووات ساعت بر مترمربع بالاترین مصرف انرژی را دارد. این تفاوت (حدود ۰/۸۷ کیلووات ساعت بر مترمربع) اگرچه اندک به نظر می‌رسد، اما در مقیاس کل ساختمان و در طول زمان می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر هزینه‌های انرژی داشته باشد.

با توجه به نتایج، استفاده از ترکیب مصالح سنگ روشن، عایق پشم‌شیشه، آجر و گچ داخلی برای دیوارهای خارجی طرح موردنظر توصیه می‌شود. این ترکیب نه تنها به دلیل عملکرد حرارتی برتر، مصرف انرژی را کاهش می‌دهد، بلکه با استفاده از سنگ روشن در نمای خارجی، می‌تواند به زیبایی بصری و دوام سازه نیز کمک کند. ترکیب این مصالح با سایر راهکارهای

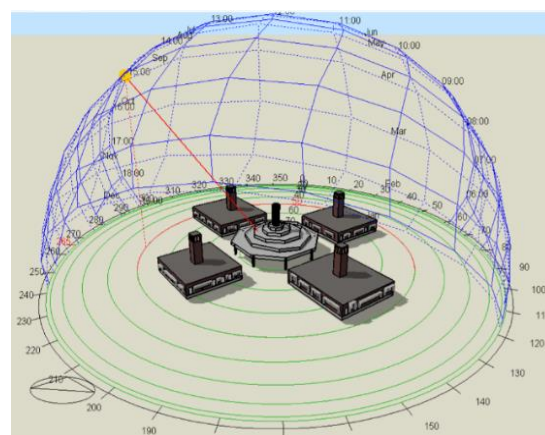


شکل (۱۳): نمودار مصرف انرژی برای سایبان‌های مختلف

جدول (۲): راهکارهای پیشنهادی سایبان برای شهر کاشان بر اساس

مبحث ۱۹

هدف از سایه‌اندازی	منبای انتخاب (زاویه سایه)	نوع سایبان پیشنهادی	جهت پنجره
کنترل تابش‌های شدید میان‌روز	۶۰ درجه	افقی	جنوبی
کاهش ورود گرمای خورشیدی صبحگاهی	۶۵ درجه	افقی	جنوب شرقی
کنترل تابش‌های مایل و گرم عصرگاهی	۳۰ تا ۴۰ درجه	عمودی (متحرک)	غربی و جنوب غربی
محافظت در برابر تابش غیرمستقیم	۶۷ درجه	افقی (با عمق کم)	شمالی



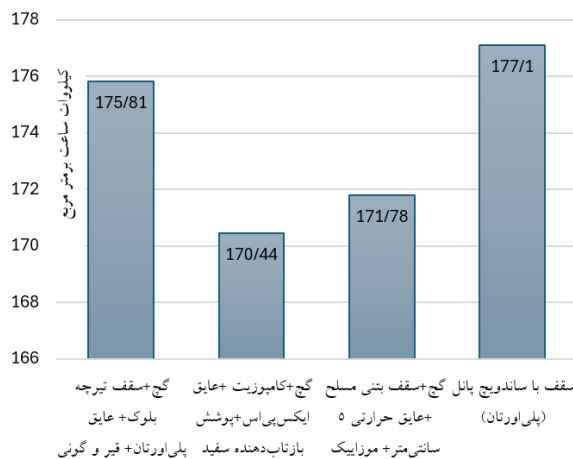
شکل (۱۴): سایبان ترکیبی افقی و عمودی با عمق ۱۰۰ سانتی متر

۶.۶. مصالح دیوارهای خارجی

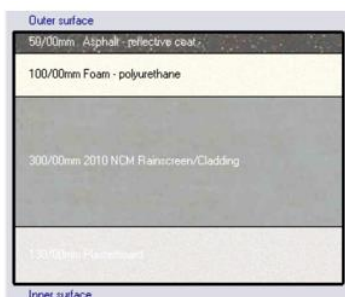
انتخاب مصالح مناسب نیز برای دیوارهای خارجی به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در بهینه‌سازی مصرف انرژی موردبررسی قرار گرفته



شکل (۱۶): سنگ روشن + عایق پشم شیشه + آجر + گچ



شکل (۱۷): نمودار بررسی مصالح سقف



شکل (۱۸): گچ و کامپوزیت با پوشش بازتاب دهنده سفید

۸.۶ مصالح دیوارهای داخلی

انتخاب مصالح مناسب برای دیوارهای داخلی نیز به عنوان یکی از عوامل مؤثر در بهینه سازی مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. دیوارهای داخلی با تأثیر بر عایق بندی حرارتی و صوتی، نقش مهمی در کاهش اتلاف انرژی و بهبود آسایش حرارتی داخل ساختمان دارند. مصرف انرژی سالیانه برای ترکیب های مختلف مصالح دیوارهای داخلی ارزیابی شده و نتایج در شکل (۱۹) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود مصرف انرژی برای مصالح مختلف شامل گچ + پلی استایرن + گچ، آجر توخالی + پشم سنگ + گچ و بلوک بتنی سبک + فوم پلی اورتان + گچ به ترتیب

بهینه سازی مانند سایبان ها و شیشه های مناسب پنجره ها، پایداری محیطی و کارایی انرژی مجموعه را به طور قابل ملاحظه ای ارتقا خواهد داد.

۷.۶ مصالح سقف بام

انتخاب مصالح مناسب برای سقف بام به عنوان یکی دیگر از عوامل کلیدی در بهینه سازی مصرف انرژی مورد توجه قرار گرفته است. سقف بام به دلیل قرار گرفتن در معرض مستقیم تابش خورشید و شرایط جوی، نقش مهمی در کاهش اتلاف انرژی و بهبود عملکرد حرارتی ساختمان ایفا می کند. مصرف انرژی سالیانه برای ترکیب های مختلف مصالح سقف بام بررسی شده و نتایج در شکل (۱۷) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود مصرف انرژی برای مصالح مختلف شامل گچ + سقف تیرچه بلوک + عایق پلی اورتان + قیر و گونی، گچ + کامپوزیت + عایق ایکس پی اس + پوشش بازتاب دهنده سفید، گچ + سقف بتنی مسلح + عایق حرارتی ۵ سانتی متر + موزاییک و سقف با ساندویچ پانل (پلی اورتان) به ترتیب برابر ۱۷۱/۷۸، ۱۷۰/۴۴، ۱۷۵/۸۱ و ۱۷۷/۱ کیلووات ساعت بر مترمربع محاسبه شده است.

نتایج نشان می دهد که ترکیب مصالح گچ، کامپوزیت، عایق ایکس پی اس و پوشش بازتاب دهنده سفید با مصرف انرژی ۱۷۰/۴۴ کیلووات ساعت بر مترمربع، کمترین میزان مصرف انرژی را در مقایسه با سایر گزینه ها ارائه می دهد (شکل ۱۸). در مقابل، سقف با ساندویچ پانل پلی اورتان با ۱۷۷/۱ کیلووات ساعت بر مترمربع بالاترین مصرف انرژی را دارد. این تفاوت (حدود ۶/۶۶ کیلووات ساعت بر مترمربع) نشان دهنده اهمیت انتخاب مصالح مناسب و استفاده از پوشش های بازتاب دهنده در کاهش جذب گرمای خورشیدی است.

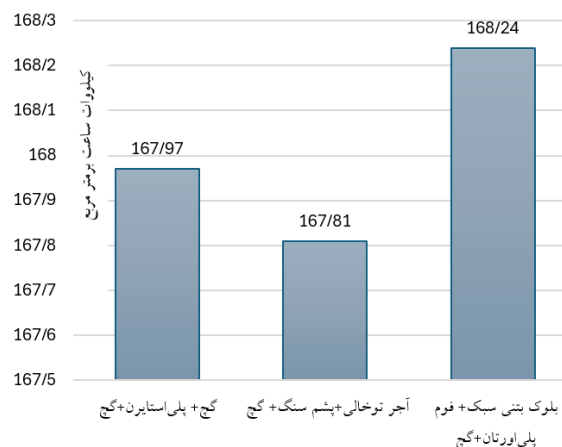
بنابراین استفاده از ترکیب گچ، کامپوزیت، عایق ایکس پی اس و پوشش بازتاب دهنده سفید برای سقف بام طرح مورد نظر توصیه می شود. این ترکیب به دلیل بهره وری حرارتی بالا و استفاده از پوشش بازتاب دهنده سفید که گرمای خورشیدی را به حداقل می رساند، عملکرد انرژی بهتری ارائه می دهد. ترکیب این مصالح با سایر راهکارهای بهینه سازی مانند دیوارهای خارجی عایق بندی شده و سایبان های مناسب، می تواند به کاهش قابل توجه هزینه های انرژی و ارتقای پایداری محیطی مجموعه کمک کند.

۷. اعمال هم‌زمان راهکارهای پیشنهادی و

جمع‌بندی

برای بررسی اعمال هم‌زمان راهکارهای پیشنهادی، شبیه‌سازی اعمال هم‌زمان و زنجیره‌ای این راهکارهای غیرفعال انجام شد و مشاهده شد که مصرف سالانه کل ساختمان از حالت اولیه (۲۶۷/۲۲ کیلووات ساعت بر مترمربع) به حالت بهینه (۱۶۷/۸۱ کیلووات ساعت بر مترمربع) کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش کل ۳۷/۲ درصدی در تقاضای انرژی سالانه است (تصاویر ۲۱ و ۲۲ و جدول ۳). با فرض مساحت تقریبی ۱۰۰۰۰ مترمربع برای این مجموعه خدمات رفاهی، این رویکرد منجر به صرفه‌جویی سالانه حدود ۹۹۴,۱۰۰ کیلووات ساعت در شبکه برق مصرفی دانشگاه می‌شود. این دستاورد نه تنها هزینه‌های عملیاتی جاری دانشگاه را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد، بلکه با کاهش تقاضا برای تولید انرژی نیروگاهی، به حفظ منابع طبیعی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک شایانی می‌کند. به‌طورکلی، این پژوهش اثبات می‌کند که طراحی غیرفعال به‌عنوان یک استراتژی پایدار، کم‌هزینه و هماهنگ با بوم، کلید اصلی بهبود عملکرد حرارتی بناهای خدماتی در اقلیم کاشان است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، پتانسیل ادغام این راهکارهای غیرفعال با سیستم‌های فعال انرژی‌های تجدیدپذیر (مانند سامانه‌های خورشیدی) و مدیریت هوشمند ساختمان مورد ارزیابی قرار گیرد. علاوه بر انطباق با مقررات ملی ساختمان ایران، رویکردهای اتخاذشده در این پژوهش، ازجمله به‌کارگیری مصالح با بازتابندگی بالا (مانند سنگ نما روشن) و استفاده از عایق‌های حرارتی مؤثر، همسو با الزامات و معیارهای ارزیابی پایداری در استانداردهای بین‌المللی مانند LEED^۱ است. به‌طور خاص، راهکارهای غیرفعال پیشنهادی می‌تواند به کسب امتیاز در دسته‌بندی LEED^۲ که بر بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تمرکز دارد، کمک شایانی نماید.

برابر ۱۶۷/۹۷، ۱۶۷/۸۱ و ۱۶۸/۲۴ کیلووات ساعت بر مترمربع محاسبه شده است.



شکل (۱۹): نمودار مصرف انرژی برای مصالح مختلف دیوارهای

داخلی

نتایج نشان می‌دهد که ترکیب مصالح آجر توخالی، پشم سنگ و گچ با مصرف انرژی ۱۶۷/۸۱ کیلووات ساعت بر مترمربع، کمترین میزان مصرف انرژی را در مقایسه با سایر گزینه‌ها ارائه می‌دهد (شکل ۲۰). در مقابل، ترکیب بلوک بتنی سبک، فوم پلی‌اورتان و گچ با ۱۶۸/۲۴ کیلووات ساعت بر مترمربع بالاترین مصرف انرژی را دارد. این تفاوت (حدود ۰/۴۳ کیلووات ساعت بر مترمربع) اگرچه اندک است، اما در مقیاس کل ساختمان و در طول زمان می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کارایی انرژی داشته باشد.



شکل (۲۰): آجر توخالی، پشم سنگ و گچ

با توجه به نتایج، استفاده از ترکیب آجر توخالی، پشم سنگ و گچ برای دیوارهای داخلی طرح موردنظر توصیه می‌شود. این ترکیب نه تنها به دلیل عملکرد حرارتی بهتر، مصرف انرژی را کاهش می‌دهد، بلکه با توجه به خواص عایق صوتی پشم سنگ، می‌تواند به بهبود آسایش صوتی فضاهای داخلی نیز کمک کند. ترکیب این مصالح با سایر راهکارهای بهینه‌سازی مانند مصالح مناسب دیوارهای خارجی و سقف بام، می‌تواند به ارتقای پایداری محیطی و کاهش هزینه‌های انرژی مجموعه کمک کند.

ساختمان، تنظیم ارتفاع کرسی چینی، مصالح قاب پنجره‌ها، نوع شیشه، طراحی سایبان‌ها، مصالح دیوارهای خارجی و داخلی و مصالح سقف بام بوده است. بر اساس تحلیل‌های شبیه‌سازی، تأثیرات تفکیکی هر یک از راهکارهای مورد مطالعه بر کاهش مصرف انرژی سالانه به شرح زیر است:

- فرم اولیه ساختمان (مربع): کاهش ۶/۴۲ درصدی مصرف انرژی (کاهش بار سالانه از ۲۸۵/۵۷ به ۲۶۷/۲۲ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال)؛ فرم مربع به دلیل نسبت سطح به حجم بهینه، کمترین تبادل حرارتی را با محیط خارج دارد.
- ارتفاع کرسی چینی (۰/۹۰ متر): کاهش ۰/۰۸ درصدی مصرف انرژی (از ۲۳۳/۴۳ به ۲۳۳/۲۴ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال)؛ این راهکار نقشی جزئی اما مثبت در بهبود عایق‌بندی کف سازه ایفا می‌کند.
- مصالح قاب پنجره (آلومینیوم بدون شکست حرارتی): کاهش ۰/۲ درصدی مصرف انرژی (از ۲۲۷/۱ به ۲۲۶/۶۵ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال).
- نوع شیشه پنجره (دوجداره با هوا): کاهش ۷/۲۸ درصدی مصرف انرژی (از ۲۲۷/۱ به ۲۱۰/۵۷ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال)؛ این انتخاب علاوه بر کارایی حرارتی مناسب، از نظر اقتصادی نیز در پروژه‌های بزرگ دانشگاهی مقرون به صرفه است.
- سایبان‌ها (ترکیبی افقی و عمودی به عمق ۱۰۰ سانتی‌متر): کاهش ۸ درصدی مصرف انرژی (از ۲۰۶/۲۶ به ۱۸۹/۷۵ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال)؛ این کاهش چشمگیر، حاصل انطباق ابعاد و زوایای سایه‌اندازی با ضوابط مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان و متناسب با جهت‌گیری جغرافیایی هر نما در اقلیم کاشان است.
- مصالح دیوارهای خارجی (سنگ روشن + پشم شیشه + آجر + گچ): کاهش ۹/۹۱ درصدی مصرف انرژی (از ۲۰۶/۲۶ به ۱۸۵/۸۱ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال)؛ استفاده از سنگ روشن به همراه عایق حرارتی، نرخ جذب و انتقال تابش خورشیدی پوسته را به حداقل می‌رساند.
- مصالح سقف بام (گچ + کامپوزیت + عایق فوم فشرده + پوشش بازتاب‌دهنده سفید): کاهش ۸/۲۷ درصدی مصرف انرژی (از ۱۸۵/۸۱ به ۱۷۰/۴۴ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال)؛ سقف بام به‌عنوان آسیب‌پذیرترین بخش پوسته در برابر



شکل (۲۱): طرح نهایی بعد از اعمال راهکارها



شکل (۲۲): طرح نهایی بعد از اعمال راهکارها

جدول (۳): مشخصات فیزیکی و ضریب انتقال حرارت جدارهای

بهینه

نوع جدار	لایه‌های تشکیل‌دهنده (از خارج به داخل)	ضخامت کل (سانتی‌متر)	ضریب انتقال حرارت
دیوار خارجی	سنگ تراورتن روشن، پشم شیشه (۵ سانت)، آجر توخالی، اندود گچ	۳۵	۰/۳۸
سقف بام	ایزوگام سفید، عایق XPS (۱۰ سانت)، سقف بتنی، گچ	۴۰	۰/۲۶
دیوار داخلی	اندود گچ، آجر توخالی، پشم سنگ، اندود گچ	۲۰	۱/۱۰
پنجره	دوجداره (۴+۱۲+۴) با پرکننده هوا و قاب آلومینیوم	-	۶۰/۲

۸. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحلیل‌های شبیه‌سازی در این پژوهش نشان‌دهنده پتانسیل بالای اصول طراحی غیرفعال در کاهش مصرف انرژی مجموعه خدمات رفاهی دانشگاه کاشان، متناسب با اقلیم گرم و خشک این منطقه است. بررسی‌های انجام‌شده بر اساس مدل‌سازی‌های انرژی و داده‌های مصرف برحسب کیلووات ساعت بر مترمربع در سال، تأثیر قابل‌توجه انتخاب‌های طراحی و مصالح را در بهبود عملکرد حرارتی و کاهش بار سالانه ساختمان اثبات می‌کند. راهکارهای موردبررسی در این مطالعه شامل فرم اولیه

کیلووات ساعت بر مترمربع) کاهش داد که نشان‌دهنده کاهش کل ۳۷/۲ درصدی در تقاضای انرژی سالانه است.

- به‌طور کلی، این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی غیرفعال، به‌عنوان یک استراتژی پایدار و کم‌هزینه، می‌تواند نقش کلیدی در بهبود کارایی انرژی ساختمان‌های خدماتی در اقلیم کاشان ایفا کند. انتخاب فرم مربع به‌عنوان فرم اولیه، به دلیل نسبت سطح به حجم بهینه و کاهش اتلاف حرارتی، همراه با سایر راهکارهای ذکر شده، به بهبود عملکرد انرژی کمک شایانی می‌کند. این رویکرد نه‌تنها از منظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است، بلکه با کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی پرمصرف، به توسعه پایدار دانشگاه کمک می‌کند.

مراجع

[1] Ghobadian, V, "Climatic Analysis of the Traditional Iranian Buildings," Tehran: University of Tehran Press, 2018. (In Persian) Available for purchase/download: <https://www.amazon.com/SUSTAINABLE-TRADITIONAL-BUILDINGS-CLIMATIC-ANALYSIS-ebook/dp/B082VWY3GL>

[2] Memarian, G. H. "Sun, Iranian Residential Architecture: Extroverted Typology," Tehran: Iran University of Science and Technology, 1996. (In Persian), Available for purchase <https://www.ferdosi.com/en-us/product/2437>

[3] Zomorodian, Z. S. Aminian, S. Tahbaz, M. "Thermal Comfort Assessment in Classrooms in Hot and Dry Climate; Field Study: An Elementary School in Kashan," Honar-Ha-Ye-Ziba: Memari-Va-Shahrsazi, Vol. 21, No. 4, pp. 17-28, 2016, <https://doi.org/10.22059/jfaup.2017.61653>. (In Persian)

[4] Souayfane, F. Fardoun, F. Biwole, P.-H. "Phase Change Materials (PCM) for Cooling Applications in Buildings: A Review," Energy and Buildings, Vol. 129, pp. 396-431, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.006>.

تابش مستقیم، با پوشش بازتاب‌دهنده عملکرد بهتری نشان می‌دهد.

- مصالح دیوارهای داخلی (آجر توخالی + پشم سنگ + گچ) : کاهش ۱/۵۴ درصدی مصرف انرژی (از ۱۷۰/۴۴ به ۱۶۷/۸۱ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال)؛ این ترکیب علاوه بر عایق حرارتی، عملکرد صوتی فضاهای داخلی را نیز ارتقا می‌دهد.
 - اعمال هم‌زمان و زنجیره‌ای راهکارهای غیرفعال پیشنهادی، مصرف سالانه کل ساختمان را از حالت اولیه (۲۶۷/۲۲ کیلووات ساعت بر مترمربع) به حالت بهینه (۱۶۷/۸۱ کیلووات ساعت بر مترمربع) کاهش داد.
- [5] Khashei, Z. "The Role of Passive Systems in Providing Comfort in Traditional Houses in Isfahan" WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 128, pp. 231-240, 2010, <https://doi.org/10.2495/ARC100231>.
- [6] Pérez-Lombard, L, Ortiz, J. Pout, C. "A Review on Buildings Energy Consumption Informatio," Energy and Buildings, Vol. 40, No. 3, pp. 394-398, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- [7] Ghorbani Naeini, H. Norouzasas, A. Piraei, P. Kazemi, M. Kazemi, M. Hamdy, M. "Impact of Building Envelope Parameters on Occupants' Thermal Comfort and Energy Use in Courtyard Houses" Architectural Engineering and Design Management, Vol. 20, No. 6, pp. 1725-1751 2023, <https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2254294>.
- [8] Al-Sanea, S. A. Zedan, M. F. "Improving Thermal Performance of Building Walls by Optimizing Insulation Layer Distribution and Thickness for Same Thermal Mass," Applied Energy, Vol. 88, No. 9, pp. 3113-3124, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.036>.
- [9] Ascione, F. De Masi, R. F. de Rossi, F. Ruggiero, S. Vanoli, G. P. "Optimization of

Building Envelope Design for nZEBs in Mediterranean Climate: Performance Analysis of Residential Case Study” Applied Energy, Vol. 183, pp. 938–957, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.027>.

[10] Attia, S. Hensen, J. L. Beltrán, L. and De Herde, A. “Selection Criteria for Building Performance Simulation Tools” Journal of Building Performance Simulation, Vol. 5, No. 3, pp. 155–169, 2012, <https://doi.org/10.1080/19401493.2010.549573>.

[11] Hamzenejad, M. Fadaei, F. Ilderabadi, P. “Assessment of Thermal Comfort Indices (PMV and PPD) Based on Daylight and House Orientation in Traditional Houses of Yazd” Journal of Architecture in Hot and Arid Climates, Vol. 8, No. 11, pp. 1–16, 2020, <https://doi.org/10.29252/ahac.8.11.1>. (In Persian)

[12] Sadineni, S. B. Madala, S. Boehm, R. F. “Passive Building Energy Savings: A Review of Building Envelope Components” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 8, pp. 3617–3631, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>.

[13] Akbari, H. Hosseini Nejad, F. S. “Optimization of Building Orientation for Solar Radiation Utilization in Hot and Dry Climate (Case Study: Isfahan, Semnan, Kerman, and Yazd)” Journal of Architecture in Hot and Arid Climates, Vol. 7, No. 2, pp. 252–266, 2019, <https://doi.org/10.29252/ahac.7.2.252>. (In Persian)

[14] Foruzanmehr, A. Vellinga, M. “The Vernacular Mind: An Investigation into the Contemporary Use of Vernacular Passive Cooling Techniques in Iran,” Building Research & Information, Vol. 39, No. 3, pp. 294–301, 2011, <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.564757>.

[15] Majidi, F. S. Aminian, S. Azimi, H. R. “Evaluation and Comparison of Thermal Comfort in Residential Neighborhoods of Isfahan” Studies on Iranian-Islamic City,

Vol. 8, No. 15, pp. 47–66, 2019, <https://doi.org/10.22034/siic.2019.102144>. (In Persian)

[16] Sözen, M. S. Gedik, G. Z. “Evaluation of Thermal Comfort Conditions in Local Vernacular Architecture: Diyarbakir Case,” Building and Environment, Vol. 42, No. 8, pp. 3001–3009, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.02.018>.

[17] Ascione, F. Bianco, N. De Masi, R. F. Mauro, G. M. “Design of the Building Envelope: A Multiobjective Optimization Approach for Residential Buildings” Applied Energy, Vol. 174, pp. 359–374, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.093>.

[18] Crawley, D. B. Hand, J. W. Kummert, M. Griffith, B. T. “Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs” Building and Environment, Vol. 43, No. 4, pp. 661–673, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>.

[19] Ozel, M. “Thermal Performance Analysis of Insulated Building Walls in Hot Climates” Energy and Buildings, Vol. 43, No. 9, pp. 2115–2121, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.018>.

[20] Santamouris, M. “Cooling the Cities—A Review of Reflective and Green Roof Mitigation Technologies to Fight Heat Island and Improve Comfort in Urban Environments” Solar Energy, Vol. 103, pp. 682–703, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>.

[21] Hosseini, S. H. Ghobadi, P. Ahmadi, T. Calautit, J. K. “Numerical Investigation of Roof Heating Impacts on Thermal Comfort and Air Quality in Urban Canyons” Applied Thermal Engineering, Vol. 123, pp. 310–326, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.074>.

[22] Kibert, C. J. “*Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*” 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016. Available for purchase: <https://www.amazon.com/Sustainable-Construction-Building-Design-Delivery/dp/1119055172> or <https://www.wiley.com/en-us/Sustainable+Construction%3A+Green+Building+Design+and+Delivery%2C+4th+Edition-p-9781119055174>

[23] Road, Housing Urban Development Research Center (BHRC), “*Iranian National Building Regulations, Topic 19: Energy Conservation*,” 5th ed. Tehran: Nashr-e Tose’e Iran, 2019. (In Persian) Free download (nearby editions):

<https://atnasr.ir/downloads/mabhas-19/>

[24] Ministry of Roads and Urban Development, “*National Building Regulations, Part 19: Energy Conservation*,” 4th ed. Tehran, Iran, 2019. (In Persian) Free download:

<https://atnasr.ir/downloads/mabhas-19/>