



Study of the Effect of Thermal Mass Variations on Thermal Comfort of Buildings in Iran's Climates Using the Köppen–Geiger method

Vahid Rezaee* , Mojtaba Masoumnezhad

Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

ABSTRACT: This study investigates and evaluates the effect of thermal mass variations and direct passive solar energy gain through south-facing glazing on providing thermal comfort conditions for the design of residential buildings in different climatic zones of Iran. The use of high or low thermal mass depends on the weather conditions of each climate and the building's function. The range of Iran's climate, based on the Köppen–Geiger classification, is divided into 9 climate types. The key environmental parameters for these 9 climates include temperature, wind speed, relative humidity, metabolic rate (MET), and clothing insulation (CLO), for which the ASHRAE Standard 55 and the PMV (Predicted Mean Vote) comfort model have been used. By importing weather parameter files of selected cities into Climate Consultant software, the output results, including thermal mass, direct passive solar gain, and comfort conditions, were obtained. The results showed that in the Yazd climate, the parameters of thermal mass in summer and direct passive solar gain in winter, with 60% and 25% respectively, have the highest and lowest impact on passively improving thermal comfort. Furthermore, the thermal mass parameter has no effect in the climates of Rasht, Ardabil, and Abali. Finally, natural ventilation methods and the effect of thermal mass in the nine climate types across Iranian cities are proposed to improve comfort conditions.

Review History:

Received: Oct. 30, 2025
Revised: Dec. 22, 2025
Accepted: Dec. 28, 2025
Available Online: Dec. 29, 2025

Keywords:

Thermal Comfort
Passive Heating and Cooling
PMV Model
Köppen–Geiger Climate Classification
ASHRAE Standard 55

1- Introduction

Advances in building technology have significantly transformed climate control and comfort in buildings. Today, technology enables the use of air conditioning and heating in deserts and even the Arctic, ensuring occupant comfort. However, this has led to a homogenization of building design and construction across different climates. This visual uniformity indicates that if local weather conditions are overlooked during building design, it can result in increased energy consumption, material use, and the exacerbation of climate change. Given that 42% of total greenhouse gas emissions are associated with buildings, this trend must be taken seriously. The pervasive use of active heating and cooling technologies facilitates occupant comfort in almost any location, while simultaneously increasing building-related carbon emissions and displacing climate-responsive design strategies [1].

Thermal mass is defined as the inherent ability of a material to absorb and retain heat, strategically employed as a passive design option to reduce cooling energy demand during warmer seasons or excessive summer heat. This design choice has demonstrated notable success in stabilizing temperature fluctuations and lowering overall energy consumption in

buildings, particularly in regions characterized by significant diurnal temperature variations, leading to considerable benefits in thermal comfort. The thermal response of buildings with high thermal mass is significantly more stable, helping to mitigate daily temperature swings, which in turn is a key factor in its effectiveness, especially when coupled with appropriate ventilation [2]. In dry climates, high thermal mass slows the rate of internal heating during summer days; in temperate climates, high thermal mass contributes to temperature stability, high levels of insulation, and prevention of infiltration; and finally, in continental climates, high thermal mass is effective for temperature stability, high insulation levels, and infiltration control.

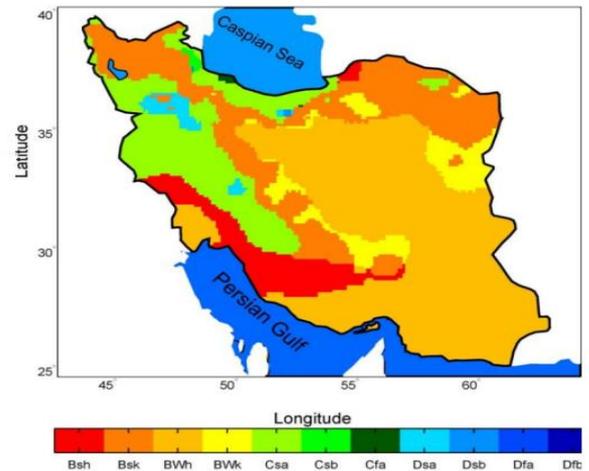
Rezaee and Taghizadeh [2] evaluated the impact of key environmental parameters across Iran's 9 climates by coding and applying the ASHRAE Standard 55 thermal comfort model in Climate Consultant software. The environmental parameters for these climates—temperature (18-38°C), air speed (0.1-0.5 m/s), relative humidity (40-80%), metabolic rate (MET: 0.7-2), and clothing insulation (CLO: 0.5-1.5)—were randomly generated. Results comparing active methods (evaporative cooling, heating & humidification, cooling & dehumidification) and passive methods (window shading,

*Corresponding author's email: vrezaee@tvu.ac.ir



Table 1. Thermal sensation scale used by Fanger.

PMV	Thermal sensation
-3	Cold
-2	Cool
-1	Slightly cool
0	Neutral
+1	Slightly warm
+2	Warm
+3	Hot

**Fig. 1. Köppen-Geiger climate classification map of Iran.**

direct passive solar heating) for thermal comfort showed that under four scenarios (winter/ summer CLO and MET levels), the best performance occurred with winter/summer CLO of 0.5 and MET of 2. For most Iranian climates, passive methods can provide thermal comfort for approximately 15–20% of the year.

This research aims to fill existing gaps in the literature and is innovative in several respects:

1. Systematic Climatic Framework: For the first time, the impact of passive design parameters has been comparatively investigated across all of Iran based on the 9-zone Köppen-Geiger classification.
2. Integrated Approach: Simultaneous analysis of thermal mass and passive solar gain through windows, simulating the interaction of these factors under more realistic conditions.
3. Quantitative, Climate-Specific Guidelines: The output is not merely qualitative; it provides percentage values for the influence of each parameter (e.g., 60% improvement from thermal mass in Yazd's summer) and identifies ineffective zones (e.g., humid climates). This offers engineers a practical design guide.
4. Integration of Standards and Local Data: Validation of the international PMV-ASHRAE Standard 55 model using Iran's indigenous climate data, enhancing the reliability of the results for decision-making in Iranian projects.
5. Defining Applicability Limits: The study clearly identifies which universal passive strategies are effective in which regions of Iran and which may be ineffective. This finding prevents resource wastage in imitative design approaches.

2- Methodology

PMV is an index that predicts the mean value of the votes of a large group of persons on a seven-point thermal sensation scale (see Table 1) [3]. An environment is considered as very comfortable when PMV varies between 0.5 and +0.5.

Most of Iran is located in a temperate region with latitude between 25- and 40- degrees north latitude. Iran has a high plateau with a majority of its territory rising beyond 475 meters above sea level. Although Iran is sandwiched between two sizable water basins (the Caspian Sea and the Persian Gulf), the effects of these basins are only felt in the immediate vicinity due to the Alborz and Zagros Mountain ranges and their geographic location. Because of this, these enormous water basins rarely have an impact on controlling the temperature of the country's interior. The produced climate map now shows more information about the country's climate zones thanks to the Köppen-Geiger method and the usage of numerous additional stations with a nearly regular distribution throughout the nation. Therefore, although there are various classifications for Iran's climate, a good way to achieve a basis for determining the country's climatic zones is the Köppen-Geiger climate classification (Figure 1) [4].

The present study aims to investigate climatic factors including temperature, humidity, wind speed, and environmental factors such as insulation and metabolic rate in cities of Iran. The methodology involves using EPW format weather files for each region, which have been extracted from websites like EnergyPlus for the climatic conditions of cities in Iran and other parts of the world. By inputting the weather files of selected cities into the Climatic Consultant software, climatic charts are generated and analyzed using the software. The output results include active methods (evaporative cooling, heating and humidification, cooling and dehumidification, individual dehumidification) and passive methods (window shading and passive solar heat gain) for thermal comfort in nine climates of Iran for four scenarios (winter and summer clothing insulation and metabolic rate).

3- Discussion and Results

Combining thermal mass with direct passive solar gain has many advantages. Using occupied spaces as a passive heating

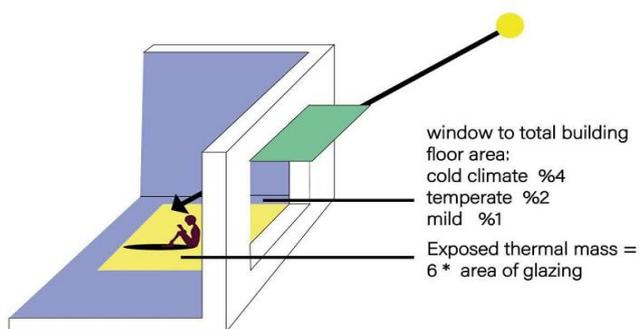


Fig. 2. The orientation of the building in combination with thermal mass and direct passive solar energy reception.

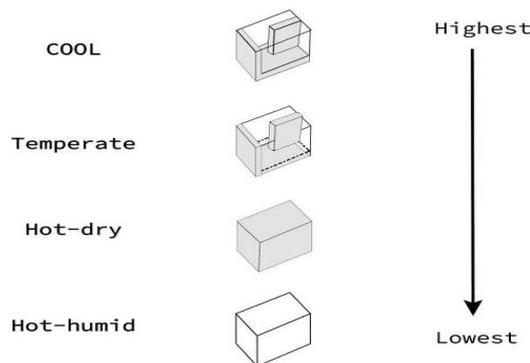


Fig. 3. Using heavy or light weight thermal mass in different climate conditions.

system for a building is an effective strategy, especially when combined with thermal mass. Sunlight must be allowed into the building during the heating season, a window facing 30 degrees south (north in the southern hemisphere) will do this, and when combined with internal heat such as heat from people and equipment and with a heat recovery system, a building may be passively heated for most or all of the winter. Therefore, climate-friendly buildings in cold climates seek to utilize solar windows to harness direct solar gain and minimize openings on the opposite facade. Figure 2 shows the orientation of a building in combination with thermal mass with direct passive solar gain. The use of heavy or light thermal mass depends on the climatic conditions and the performance of the building. In hot and dry locations, thermal mass in walls and roofs is needed to balance large diurnal temperature differences [5]. In cool and temperate regions, thermal mass is particularly useful in west-facing walls, which are exposed to the most solar radiation. For longer and cooler winters (and longer and hotter summers), and in cold climates, internal thermal mass is also useful. In hot and humid locations, a lightweight structure is preferred. Apart from hot and humid locations, a combination of heavy and light buildings is usually used. Figure 3 shows the use of heavy or light thermal mass in different climatic conditions.

4- Conclusions

This study investigated the influence of thermal mass and direct passive solar gain on the thermal comfort of residential buildings. Thermal comfort conditions were analyzed for 9 of the 31 Köppen-Geiger climate zones present in Iran—specifically BWh, BSk, BSh, BWk, CSa, CSb, CFa, DSa, and DSb. Weather data in EPW format was processed using Climate Consultant software, applying the ASHRAE Standard 55 and PMV model. The output for selected cities, including thermal mass, direct passive solar gain, comfort conditions, and natural ventilation strategies, was examined through various charts and tables. The key findings for the nine climates are summarized as follows:

1. Hot Desert (BWh - Yazd): Passive strategies can achieve comfort for 1,827 hours (20% of the year). Heavy thermal mass improves summer comfort hours by up to 65%, while direct solar gain adds 15-25% in winter. Design should employ high-capacity materials (e.g., concrete, brick) with night ventilation and controlled winter solar intake.
2. Temperate with Hot Dry Summer (CSa - Khorramabad): Passive comfort is possible for 1,198 hours (14% of the year). Medium thermal mass improves summer comfort by up to 50%, with controlled winter solar gain adding 20-25%. Design should focus on internal thermal mass and deep shading for south-facing windows.
3. Cold Semi-Arid (BSk - Mashhad): Passive comfort is achievable for 1,814 hours (20.7% of the year). Medium thermal mass provides up to 50% improvement in warm months, with winter solar gain contributing ~15%. A balanced design combining medium thermal mass, insulation, and movable shading for south windows is recommended.
4. Hot Semi-Arid (BSh - Sabzevar): Passive strategies yield 1,756 comfort hours (20% of the year). Medium thermal mass (up to 50%) and winter solar gain (up to 20%) are effective. Design requires a combined approach with medium thermal mass, insulation, and emphasis on effective window shading, especially on the south facade.
5. Humid Temperate (CFa - Rasht): Passive comfort is limited to 489 hours (5.6% of the year). Heavy thermal mass has negligible benefit, but winter solar gain can add 15-20%. Design must prioritize moisture-resistant insulation, extensive natural ventilation, and humidity control, avoiding investment in heavy thermal mass.
6. Cold Desert (BWk - Kerman): Passive comfort is possible for 1,741 hours (19.9% of the year). Heavy thermal mass improves summer comfort by up to 60%, with direct winter solar gain adding ~25%. Design should combine heavy thermal mass with a highly insulated envelope to reduce winter heat loss, using appropriate summer

- shading.
7. Temperate with Dry, Warm Summer (CSb - Ardabil): Passive comfort is achievable for only ~10% of the year. Thermal mass is ineffective for summer cooling, but passive solar heating can improve winter comfort by over 20%. Design should focus on high thermal insulation and maximizing winter solar gain, avoiding heavy thermal mass for cooling.
 8. Cold Semi-Arid with Hot Summer (DSa - Hamedan): Passive strategies provide 1,263 comfort hours (14% of the year). Light-to-medium thermal mass improves comfort by up to 33% in peak summer, with winter solar gain adding 15-20%. Given very cold winters and hot summers, design must prioritize envelope insulation, potentially using systems like double-skin walls with internal mass.
 9. Cold Semi-Arid with Warm Summer (DSb - Abali): Passive comfort is attainable for 1,446 hours (16.5% of the year). Thermal mass is ineffective in summer, but passive solar gain is highly effective in winter. Design must concentrate on super-insulated, airtight envelopes, windows with very

low U-values, and maximizing winter solar gain, making passive solar heating the key strategy.

References

- [1] S. Herb, S. Wolk, C. Reinhart, Beyond the bioclimatic chart: An automated simulation-based method for the assessment of natural ventilation and passive design potential, *Building and Environment*, 269 (2025) 112362.
- [2] V. Rezaee, A. Taghizadeh, Evaluating the impact of environmental indicators on thermal comfort for different climates of Iran using the PMV model, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 57(1) (2025). (in Persian)
- [3] H. Heywood, 101 rules of thumb for low energy architecture, Riba publishing, 2019.
- [4] T. Raziqi, Koppen-Geiger climate classification of Iran and investigation of its changes during 20th century, (2017). (in Persian)
- [5] P. Mousighichi, Comparison of Courtyards in Traditional Iranian Houses in Different Climates of Iran, *İzmir Ekonomi Üniversitesi*, 2023.



مطالعه تاثیر تغییرات جرم حرارتی بر آسایش حرارتی ساختمان‌ها در اقلیم‌های ایران با روش کوپن - گایگر

وحید رضائی^{۱*}، مجتبی معصوم‌نژاد^{۱b}

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۸
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸

کلمات کلیدی:

آسایش حرارتی
سرمایش و گرمایش غیرفعال
مدل پی‌ام‌وی
اقلیم شناسی کوپن - گایگر
مدل اش‌ری ۵۵

خلاصه: در این پژوهش، تاثیر تغییرات جرم حرارتی و دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی از طریق شیشه‌های رو به خورشید در تامین شرایط آسایش حرارتی جهت طراحی ساختمان‌های مسکونی برای شرایط مختلف اقلیمی ایران بررسی و ارزیابی شده است. استفاده از جرم حرارتی با وزن سنگین یا سبک به شرایط آب و هوای هر اقلیم و عملکرد ساختمان بستگی دارد. محدوده اقلیم ایران بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن - گایگر، به ۹ اقلیم تقسیم می‌شود. پارامترهای شاخص محیطی در این ۹ اقلیم شامل دما، سرعت باد، رطوبت نسبی، نرخ متابولیک (میت) و عایق پوشش (کلو) می‌باشند که از روش استاندارد اش‌ری ۵۵ و مدل آسایش پی‌ام‌وی استفاده شده است. با وارد کردن فایل پارامترهای آب و هوایی شهرهای منتخب در نرم‌افزار کلابمنت کانسالتنت، نتایج خروجی شامل جرم حرارتی، دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی و شرایط آسایش بدست آمد. نتایج نشان داد در اقلیم یزد پارامترهای جرم حرارتی در تابستان و دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی در زمستان به ترتیب با ۶۰ و ۲۵ درصد بیشترین و کمترین تاثیر در بهبود افزایش آسایش حرارتی به صورت غیرفعال را دارند. همچنین پارامتر جرم حرارتی در اقلیم‌های رشت، اردبیل و اَبعلی تأثیری ندارد. در نهایت روش‌های تهویه طبیعی و تاثیر جرم حرارتی در اقلیم‌های نه‌گانه در شهرهای ایران برای بهبود شرایط آسایش پیشنهاد شد.

۱- مقدمه

در حال افزایش است، به ویژه در آب و هوای گرمسیری و نیمه گرمسیری، تهویه طبیعی به عنوان یک استراتژی خنک‌کننده سازگار با آب و هوا بسیار موثر است. در مرحله اولیه، مصرف انرژی مرتبط با تهویه فضا را می‌توان با استفاده از معماری با کنترل تعامل عناصر اقلیمی با ساختمان کاهش داد. جرم حرارتی به عنوان توانایی ذاتی یک ماده برای جذب و حفظ گرما تعریف می‌شود که به طور استراتژیک به عنوان یک گزینه طراحی غیرفعال برای کاهش تقاضای انرژی خنک‌کننده در طول فصول گرمتر یا گرمای بیش از حد تابستان استفاده می‌شود. این انتخاب در طراحی، موفقیت قابل توجهی را در تثبیت نوسانات دما و کاهش مصرف کلی انرژی در ساختمان‌ها، به ویژه در مناطقی که با تغییرات دمای روزانه قابل توجه مشخص می‌شوند، نشان داده است که منجر به مزایای قابل توجهی در آسایش حرارتی می‌شود. پاسخ حرارتی ساختمان‌هایی با جرم حرارتی بالا به طور قابل توجهی پایدارتر است و به کاهش تغییرات دمایی روزانه کمک می‌کند، که به نوبه خود عامل مهمی برای اثربخشی آن است، به‌ویژه زمانی که با تهویه مناسب همراه باشد [۲]. در اقلیم خشک با جرم حرارتی بالا، باعث کاهش سرعت گرمایش

پیشرفت تکنولوژی در صنعت ساختمان به طور قابل توجهی کنترل آب و هوا و آسایش در ساختمان‌ها را تغییر داده است. امروزه فناوری، امکان استفاده از تهویه مطبوع و گرمایش در بیابان‌ها و حتی قطب شمال را فراهم می‌کند و آسایش ساکنان را تضمین می‌نماید. با این حال، این کار منجر به شباهت در طراحی ساختمان و ساخت و ساز در اقلیم‌های مختلف شده است. این یکنواختی بصری نشان می‌دهد اگر شرایط آب و هوایی محلی در طول طراحی ساختمان نادیده گرفته شود، می‌تواند منجر به افزایش مصرف انرژی، مواد و همچنین تشدید تغییرات آب و هوایی شود. از آنجایی که ۴۲ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با ساختمان است، این روند باید جدی گرفته شود. استفاده فراگیر از فن‌آوری‌های گرمایش و سرمایش فعال، آسایش ساکنین را تقریباً در هر مکانی تسهیل می‌کند، در حالی که انتشار کربن مربوط به ساختمان را افزایش می‌دهد و استراتژی‌های طراحی سازگار با آب و هوا را جایگزین می‌کند [۱]. در مناطقی که ساخت و ساز به سرعت

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: vrezae@tvu.ac.ir

و تهویه مطبوع^۶ متمرکز دارند. تحقیقات بسیار زیادی در زمینه آسایش حرارتی و مدل‌های مختلف آسایش انجام شده است. اما مهمترین تحقیقات در زمینه جرم حرارتی با آسایش حرارتی به صورت زیر انجام شده است.

رضائی و تقی‌زاده [۲] تاثیر پارامترهای شاخص محیطی در ۹ اقلیم ایران را با استفاده از کدنویسی و مدل آسایش حرارتی استاندارد اشری ۵۵ در نرم‌افزار کلایمنت کانسالنت انجام دادند. پارامترهای شاخص محیطی در این ۹ اقلیم شامل دما بین ۱۸ تا ۳۸ درجه سلسیوس، سرعت هوا بین ۰/۱ تا ۰/۵ متر بر ثانیه، رطوبت نسبی بین ۴۰ تا ۸۰ درصد، نرخ متابولیک (میت) بین ۰/۷ تا ۲ و عایق لباس (کلو) ۰/۵ تا ۱/۵ به صورت تصادفی تولید می‌شوند. نتایج روش‌های فعال (سرمایش تبخیری، گرمایش و رطوبت‌زنی، سرمایش و رطوبت‌گیری) و روش‌های غیرفعال (سایه‌اندازی پنجره‌ها، حرارت مستقیم غیرفعال خورشیدی) برای آسایش حرارتی نشان داد که برای چهار حالت (کلو زمستانی، تابستانی و میت) بهترین عملکرد در حالت (کلو زمستانی و تابستانی ۰/۵ و میت برابر با ۲)، برای اکثر اقلیم‌های ایران تقریباً ۱۵ تا ۲۰ درصد اوقات سال شرایط آسایش با روش‌های غیرفعال برقرار است.

رودریگز و همکاران [۳] سناریوهای حال و آینده در کاهش مزایای جرم حرارتی برای ۲۱ شهر اقلیم ایران را ارزیابی کردند. همچنین تقاضاهای سرمایش و گرمایش در نرم‌افزار انرژی پلاس مورد ارزیابی قرار گرفت و بازده طراحی سیستم حال و آینده در نظر گرفته شد. یافته‌ها نشان داد با توجه به هندسه ساختمان، استفاده از مصالح با وزن سنگین به شدت با شاخص‌های مربوط به فشردگی ساختمان ارتباط دارد، در حالی که استفاده از مصالح با وزن سبک، بیشتر با شاخص‌های مربوط به عایق هم‌هنگ است. با این حال، با گرم شدن آب و هوا یا حرکت به سمت مناطق گرم‌تر، تفاوت‌های قابل توجهی بین ساختارهای با وزن سبک و سنگین مربوط به شکل و لعاب از بین می‌رود. ثمنی و همکاران [۴] تاثیر جرم حرارتی بر اتلاف حرارت پوششی در کالدریوم حمام سنتی اقلیم آب و هوای گرم خشک شهر یزد را انجام دادند. این پژوهش به کمک نرم‌افزار دیزاین بیلدر راه‌کارهایی در مورد گرمایش غیرفعال ارائه داد. نتایج نشان داد که جرم حرارتی موثرترین رویکرد در حمام‌های یزد است که به ترتیب ۳۷/۵ و ۳۷/۳ درصد کاهش اتلاف گرمای زمستانی داشته است. گنجی خیبری و همکاران [۵] سه استراتژی بهبود مقدار ضریب انتقال حرارت با لایه‌های شیشه‌ای اضافی (بر اساس عایق)، استفاده از دستگاه‌های سایه‌انداز، و تغییر شفافیت یا بازتاب شیشه (کنترل تشعشع) پوشش ساختمانی را با مدل پی‌اوی ارائه کردند. نتایج نشان

داخلی در روزهای تابستان و در اقلیم معتدل، جرم حرارتی بالا برای پایداری دما، سطوح بالای عایق، جلوگیری از نفوذ، و نهایتاً در اقلیم قاره‌ای جرم حرارتی بالا برای پایداری دما، سطوح بالای عایق، جلوگیری از نفوذ تاثیر دارد. معماران به سه اهم کلیدی دسترسی دارند تا ساختمان‌های خود را برای پاسخ به شرایط آب و هوایی طراحی کنند:

• کنترل دریافت‌های خورشیدی از طریق نسبت مناسب پنجره به دیوار و استفاده از سایه متحرک

• تهویه طبیعی از طریق پنجره‌هایی که در پاسخ به باد و دمای بیرون عمل می‌کنند.

• افزایش ساعات آسایش داخل ساختمان از طریق استفاده عمده از جرم حرارتی

بسته به شرایط آب و هوایی، استفاده هم‌هنگ از این سه استراتژی طراحی غیرفعال ممکن است بدون نیاز به سیستم تهویه مطبوع منجر به شرایط آسایش حرارتی داخلی شود. به طور سنتی، دو رویکرد اصلی برای بررسی پتانسیل تهویه طبیعی یک ساختمان در طول طراحی شماتیک وجود داشته است: استفاده از نمودار زیست اقلیم و مدل‌سازی انرژی ساختمان. پژوهش حاضر روی زیست اقلیم تمرکز دارد. ابزارهای مختلفی در دسترس هستند که روش نمودار زیست اقلیم را دیجیتالی کرده‌اند که شناخته شده‌ترین آنها کلایمنت کانسالنت^۱ است. سه استاندارد مربوطه در رابطه با آسایش حرارتی شامل: استاندارد بین‌المللی ایزو ۷۷۳۳ (۲۰۰۵)^۲، استاندارد اروپایی ای ان ۱۵۲۵۱ (سی ای ان ۲۰۰۷)^۳ و استاندارد اشری ۵۵ (۲۰۱۰)^۴ هستند. استاندارد اشری ۵۵ ترکیبی از عوامل محیط حرارتی داخلی و عوامل شخصی را مشخص می‌کند که شرایط محیطی حرارتی قابل قبول برای اکثر ساکنان یک فضا را ایجاد می‌کند [۱]. در مدل استاندارد اشری ۵۵ آسایش حرارتی بر اساس دمای حباب خشک، سطح لباس، فعالیت متابولیک، سرعت هوا، رطوبت، و میانگین دمای تابشی است. در داخل خانه فرض می‌شود که میانگین دمای تابشی نزدیک به دمای حباب خشک است. منطقه‌ای که اکثر مردم در آن راحت هستند با استفاده از مدل پی‌ام‌وی (متوسط رای پیش‌بینی شده)^۵ محاسبه می‌شود. در محیط‌های مسکونی، افراد لباس‌ها را متناسب با فصل می‌پوشند و در سرعت‌های بالاتر هوا احساس راحتی می‌کنند و بنابراین دامنه راحتی بیشتری نسبت به ساختمان‌هایی با سیستم‌های گرمایش، تهویه

1. Climate Consultant
2. ISO 7730 (2005)
3. EN 15251 (CEN 2007)
4. ASHRAE 55
5. Predicted Mean Vote [-] (PMV)

6. heating, ventilation, and air conditioning (HVAC)

۳۵/۹ درصد بیشتر از سازه‌های سنگین کاهش می‌دهد. دو کمربند بین مدار رأس‌السرطان و عرض جغرافیایی ۶۰ درجه شمالی و بین مدار رأس‌الجدی و عرض جغرافیایی ۴۵ درجه جنوبی برای تهویه طبیعی جرم حرارتی داخلی در شب مناسب هستند و به کاهش تقاضای سرمایش سالانه بیش از ۱/۲۵ کیلووات ساعت بر متر مربع دست می‌یابند. در مناطق آب و هوایی کویری، این تکنیک پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای کاهش تقاضای سرمایش، تا ۶/۶۷ کیلووات ساعت بر متر مربع در سال، نشان می‌دهد.

روسلا آلسی و همکاران [۱۰] کمی‌سازی انعطاف‌پذیری انرژی وابسته به زمان ارائه شده توسط جرم حرارتی ساختمان را بررسی کردند. این ارزیابی تکامل زمانی، با ارزیابی اولیه انعطاف‌پذیری انرژی، از طریق محاسبه ظرفیت ذخیره‌سازی موجود و راندمان ذخیره‌سازی، با هدف ارزیابی عملکرد فرآیند ذخیره‌سازی گرما در جرم حرارتی ساختمان، انجام شد. انعطاف‌پذیری برای دو سیستم گرمایشی، رادیاتور و گرمایش از کف، کمی‌سازی شد. نتایج نشان داد که حالت دارای سیستم گرمایش از کف، ۵۰ درصد از گرمای ذخیره شده در جرم حرارتی را پس از یک روز بازبازی می‌کند، در حالی که حالت دارای رادیاتور ۳ روز طول می‌کشد تا به ۵۰ درصد بازبازی گرما برسد.

ناری یون و ونتائو وو [۱۱] با استفاده از یک مدل ریاضی که با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شده است، تاب‌آوری حرارتی کوتاه‌مدت و انعطاف‌پذیری انرژی در ساختمان‌ها را بررسی کردند. یک یافته کلیدی و جذاب، نقش‌های متمایز جرم‌های حرارتی خارجی و داخلی بود که به طور قابل توجهی در افزایش تاب‌آوری حرارتی و انعطاف‌پذیری انرژی متفاوت بودند. جرم داخلی به طور قابل توجهی دمای اوج را کاهش داد، در حالی که جرم خارجی وقوع آنها را به تأخیر انداخت. این مطالعه بینش‌هایی در مورد طراحی جرم حرارتی برای اقلیم‌های مختلف، مربوط به شرایط آب و هوایی آزمایشگاهی متنوع، ارائه می‌دهد. در نهایت، این تحقیق بینش‌های حیاتی در مورد بهینه‌سازی عملکرد جرم حرارتی و پنجره ارائه می‌دهد و سهم منحصر به فرد آنها را در بهره‌وری انرژی و آسایش ساختمان برجسته می‌کند.

ونتائو وو و همکاران [۱۲] با در نظر گرفتن ابعاد جرم، نرخ‌های تهویه متغیر ساعتی و دمای هوا، یک مدل تحلیلی برای تهویه طبیعی شبانه با جرم حرارتی داخلی توسعه دادند. مدل تحلیلی در نرم‌افزار شبیه‌سازی انرژی کل ساختمان ادغام شده است تا محاسبه اثر جرم حرارتی داخلی را بهبود بخشد. این مدل تحلیلی برای مطالعه بهره‌وری انرژی و خطر گرمای بیش از حد برای یک بلوک کلاس درس کانتربری در نیوزیلند به کار گرفته شده است. مطالعه موردی نشان می‌دهد که با خنک‌سازی طبیعی شبانه دال بتنی کف،

داد برای آب و هوای گرم‌تر و استوایی‌تر، تکنیک‌های متمرکز بر بهره‌وری خورشیدی مانند شیشه‌های الکتروکرومیک و دو جداره با سایه دائمی اغلب بهترین عملکرد را دارند. کوچینسکی و همکاران [۶] تأثیر جرم حرارتی، تهویه شبانه و سایه‌اندازی پنجره‌ها بر آسایش حرارتی تابستانی ساختمان‌ها در اقلیم معتدل را بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش جرم حرارتی اتاق از سبک به خیلی سنگین بدون تهویه شبانه منجر به کاهش میانگین اوج دما به میزان ۳/۷ درجه کلون در روز و ۱/۲ درجه کلون در شب خواهد شد. کوچینسکی و استاشزوک [۷] مطالعه تجربی تأثیر جرم حرارتی بر آسایش حرارتی و تقاضای انرژی سرمایشی در ساختمان‌های مسکونی را بررسی کردند. اثر خنک‌کنندگی توده حرارتی ساختمان در دوره ۱۴ روزه موج گرما با تغییرات جزئی روزانه ثابت باقی ماند. کاهش کلی در تقاضای انرژی خنک‌کننده به دست آمده به ترتیب ۶۷ درصد در دمای نقطه تنظیم ۲۵ درجه سلسیوس و ۷۵ درصد در دمای نقطه تنظیم ۲۶ درجه سلسیوس بود. کاندیلی و همکاران [۸] تحلیل تجربی و عددی از یک سیستم نوآورانه دیوار ترومب کامپوزیت^۱ با استفاده از یک صفحه کامپوزیت ژئولیت-پرلیت طبیعی به عنوان جرم حرارتی، با هدف پیشبرد کاربردهای ساختمان‌سازی پایدار ارائه دادند. این سیستم جدید به طور منحصر به فردی ظرفیت گرمایی ویژه بالای ژئولیت طبیعی را با رسانایی گرمایی پایین پرلیت ترکیب می‌کند و ذخیره‌سازی و حفظ گرما را در کاربردهای انرژی خورشیدی غیرفعال بهینه می‌سازد. یک مدل جامع دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی دینامیک همرفت طبیعی و انتقال حرارت توسعه داده شد و با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد. نتایج نشان‌دهنده حداکثر اختلاف دمای ۱۱/۵ درجه سلسیوس بین شرایط داخلی و خارجی است که پتانسیل سیستم دیوار ترومب کامپوزیت را برای افزایش بهره‌وری انرژی و آسایش حرارتی داخلی در ساختمان‌های تقریباً صفر انرژی^۲ نشان می‌دهد.

مانینگ تان و همکاران [۹] یک چارچوب مدل‌سازی ساده و دقیق برای ارزیابی یک مدل جرم حرارتی داخلی معتبر و به کارگیری آن برای تعیین کمیت پتانسیل کاهش تقاضای سرمایش در فضایی با پیکربندی‌های مختلف جرم حرارتی و پوشش و در مناطق آب و هوایی مختلف را انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از گرانیته به عنوان جرم حرارتی داخلی، سه برابر مؤثرتر از بتن در کاهش بار سرمایشی پیک است. افزودن بیش از حد جرم حرارتی داخلی می‌تواند اثرات نامطلوبی بر کاهش بار سرمایشی داشته باشد. استفاده از این تکنیک در ساختمان‌هایی با سازه‌های سبک، بار سرمایشی پیک را

1. Composite Trombe Wall (CTW) system
2. nearly zero-energy buildings (nZEB)

۴. تلفیق استاندارد و داده‌های محلی: اعتباربخشی به مدل بین‌المللی پی‌ام‌وی - اشری ۵۵ با استفاده از داده‌های آب‌وهوایی بومی ایران، که قابلیت اتکای نتایج برای تصمیم‌گیری در پروژه‌های ایرانی را افزایش می‌دهد.

۵. تعیین مرز کاربرد: این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که کدام استراتژی‌های غیرفعال جهانی، در کدام مناطق ایران کارآمد هستند و کدام یک ممکن است بی‌تأثیر باشند. این یافته از اتلاف منابع در طراحی‌های تقلیدی جلوگیری می‌کند.

۲- مدل پی‌ام‌وی

در میان پروتکل‌های موجود برای برآورد آسایش حرارتی فضاهای داخلی، مدل فن‌گر^۱ یکی از پرکاربردترین و توسعه‌یافته‌ترین‌ها مدلهاست و توسط چندین استاندارد بین‌المللی از جمله ایزو ۷۷۳۰، استاندارد اشری ۵۵، استاندارد سی ای ان سی ۱۷۵۲^۲ و ای ان ۱۶۷۹۸-۱^۳ پذیرفته شده است. این مدل تعادل حرارتی بین ساکنین و محیط را در شرایط حالت پایدار محاسبه می‌کند و از میانگین رای پیش‌بینی شده (پی‌ام‌وی) به عنوان یک شاخص نظری استفاده می‌کند که درک آسایش افراد در معرض شرایط محیطی را توصیف می‌کند. مدل پی‌ام‌وی احساس حرارتی ساکنان فضاهای داخلی را در مقیاس هفت نقطه‌ای با شرایط آسایش برای مقادیر پی‌ام‌وی در محدوده بین ۰/۵- تا ۰/۵+ بیان می‌کند. معادله کلی برای پی‌ام‌وی را می‌توان در معادله (۱) مشاهده کرد [۵].

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)L \quad (1)$$

در رابطه بالا M نرخ متابولیسم و L بار حرارتی روی بدن است که به عنوان تفاوت بین تولید گرمای داخلی و از دست دادن گرما به محیط تعریف می‌شود. شاخص پی‌بی‌دی (درصد نارضایتی حرارتی پیش‌بینی شده)^۴ از رابطه (۲) تعیین می‌شود.

$$PPD = 100 - 95e^{(-0.03353 \times PMV^4 - 0.2179 \times PMV^2)} \quad (2)$$

تقاضای سرمایش سالانه ۴/۲ کیلووات ساعت بر متر مربع در ساعت کاهش می‌یابد. یک کلاس درس با تهویه طبیعی شبانه جرم حرارتی داخلی، ۲۴ درصد زمان کمتری را در معرض خطر گرمای بیش از حد قرار می‌دهد.

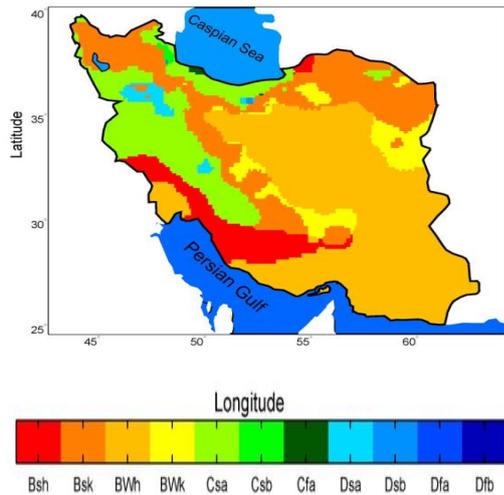
یو جیا و همکاران [۱۳] بررسی جامع تأثیر جرم حرارتی ساختمان بر کاهش مصرف انرژی گرمایشی و بهبود آسایش حرارتی داخلی برای اتاق‌های با گرمایش متناوب در منطقه گرم تابستان و سرد زمستان چین با استفاده از مدل معتبر انرژی پلاس انجام داده اند. نتایج نشان می‌دهد که جرم حرارتی ساختمان می‌تواند آسایش حرارتی داخلی برای اتاق‌های با گرمایش متناوب را به طور قابل توجهی بهبود بخشد، در حالی که مصرف انرژی گرمایشی را افزایش می‌دهد. میزان تأثیر عمدتاً مربوط به ضریب انباشت گرمای دیوار داخلی، مقاومت حرارتی لایه عایق دیوار خارجی و میانگین دمای هوای بیرون در دوره‌های غیر گرمایشی است.

در این پژوهش، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار کلایمنت کانسالتنت تأثیر پارامترهای شاخص محیطی شامل دما، سرعت باد، رطوبت نسبی، نرخ متابولیک و عایق پوشش بر روی آسایش حرارتی در ۹ اقلیم ایران با مدل پی‌ام‌وی ارزیابی شده است. سپس با استفاده از تحلیل داده‌های نتایج و مدل آسایش حرارتی استاندارد اشری ۵۵ در نرم‌افزار کلایمنت کانسالتنت تأثیر پارامترهای جرم حرارتی و دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی روی طراحی ساختمان پیشنهاد شد. با مطالعه پیشینه تحقیق‌های انجام شده نیاز به یک پژوهش درباره تأثیر جرم حرارتی برای اقلیم‌های مختلف ایران در زمینه آسایش حرارتی ضروری و لازم است.

این پژوهش با هدف پر کردن خلأهای موجود در ادبیات موضوع، از چند منظر حاوی نوآوری است:

۱. چارچوب اقلیمی نظام‌مند: برای نخستین بار تأثیر پارامترهای طراحی غیرفعال با اتکا بر طبقه‌بندی ۹ گانه کوپن-گایگر برای کل ایران به صورت تطبیقی بررسی شده است.
۲. رویکرد ترکیبی: تحلیل همزمان جرم حرارتی و دریافت انرژی خورشیدی غیرفعال از طریق پنجره‌ها، که تعامل این دو عامل را در شرایط واقعی‌تر شبیه‌سازی می‌کند.
۳. دستورالعمل‌های کمی و اقلیم‌محور: خروجی این تحقیق صرفاً کیفی نیست، بلکه مقادیر درصدی تأثیر هر پارامتر (مانند ۶۰ درصد بهبود ناشی از جرم حرارتی در تابستان یزد) و همچنین تشخیص مناطق بی‌تأثیر (مانند اقلیم‌های مرطوب) را ارائه می‌دهد. این امر یک راهنمای طراحی عملیاتی در اختیار مهندسان می‌گذارد.

1. Fanger
2. CEN CR 1752
3. EN 16798-1
4. Predicted Percentage of Dissatisfied [%]- (PPD)



شکل ۱. طبقه‌بندی اقلیم کوپن - گایگر در ایران [۱۴-۱۵].

Fig. 1. Köppen-Geiger climate classification in Iran.

— گایگر، اقلیم‌های بیابانی خشک و بسیار گرم^۳، نیمه بیابانی خشک و سرد^۴، نیمه بیابانی خشک و بسیار گرم^۵ و معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم^۶ از گروه‌های مهم اقلیمی ایران هستند که هر کدام قسمت بزرگی از مساحت کشور را در بر می‌گیرند و سایر گروه‌های اقلیمی شامل بیابانی خشک و سرد^۷، معتدل با تابستان‌های خشک و گرم^۸، اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم^۹، اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و گرم^{۱۰} و معتدل پرباران با تابستان‌های گرم^{۱۱} بخش بسیار کوچکی از مساحت کشور را تشکیل می‌دهند [۱۵] (شکل ۱).

۴- روش تحقیق

تحقیق حاضر با هدف بررسی عوامل اقلیمی روی جرم حرارتی و آسایش حرارتی در ساختمان برای شهرهای مختلف ایران می‌باشد. نحوه کار بدین صورت است که در هر منطقه فایل‌های آب و هوایی با فرمت EPW داده

3. Hot desert climate (BWsh)
4. Cold semi-arid climate (BSk)
5. Hot semi-arid climate (BSh)
6. Hot-summer Mediterranean climate (CSa)
7. Cold desert climate (BWk)
8. Warm-summer Mediterranean climate (CSb)
9. Mediterranean-influenced hot-summer humid continental climate (DSa)
10. Mediterranean-influenced warm-summer humid continental climate (DSb)
11. Humid subtropical climate (CFa)

فرصیات زیر در این پژوهش در نظر گرفته شده است:

- ۱- میانگین دمای تابشی^۱ تقریباً برابر با دمای حباب خشک است.
- ۲- دمای حباب خشک متوسط در فصل‌های زمستان و تابستان استفاده شد.
- ۳- رطوبت نسبی متوسط در فصل‌های زمستان و تابستان استفاده شد.
- ۴- براساس استاندارد اشری ۵۵ در مدل پی‌ام‌وی در نرم‌افزار کلايمنت کانسالتنت مقدار کلو زمستانی ۱ و کلو تابستانی ۰/۵ می‌باشد.
- ۵- براساس استاندارد اشری ۵۵ در مدل پی‌ام‌وی در نرم‌افزار کلايمنت کانسالتنت مقدار میت ۱/۱ می‌باشد.
- ۶- مقدار PPD برابر ۱۰ درصد می‌باشد.
- ۷- کمترین و بیشترین مقدار «دمای موثر جدید»^۲ زمستانی در مدل پی‌ام‌وی به ترتیب برابر با ۲۰/۳ و ۲۴/۳ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.
- ۸- بیشترین مقدار «دمای موثر جدید» تابستانی در مدل پی‌ام‌وی برابر با ۲۶/۷ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.
- ۹- ماکزیمم رطوبت در مدل پی‌ام‌وی برابر با ۸۴/۶ درصد می‌باشد.

۳- شرایط اقلیمی ایران برحسب روش کوپن - گایگر

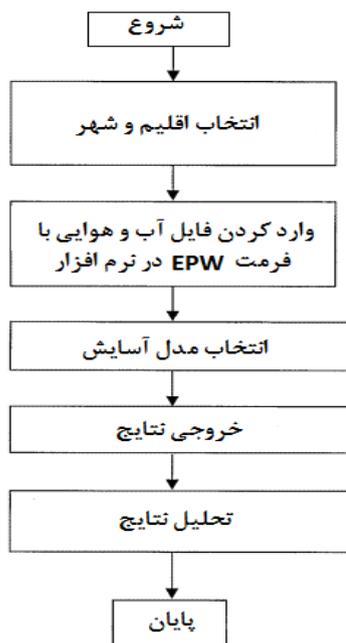
وضعیت غالب آب و هوای یک منطقه که در یک دوره درازمدت وجود داشته و تابعی از پارامترهای هواشناسی نظیر دما، بارندگی، رطوبت، تشعشع، باد و غیره می‌باشد را اقلیم آن منطقه می‌نامند. در مورد تقسیم‌بندی اقلیمی نقاط مختلف جهان، روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده که از میان آنها روش کوپن دانشمند اتریشی مورد قبول قرار گرفته است [۱۴]. کوپن براساس رشد و نمو نباتات، انواع مختلف اقلیم در جهان را معرفی کرده است. اصولاً در بسیاری از مناطق جهان، اقلیم به وسیله عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا مشخص می‌شود. ایران با قرار گرفتن بین ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض جغرافیایی شمالی، در منطقه گرم قرار دارد و از نظر ارتفاع نیز، فلات مرتفعی است که مجموع سطوحی از آن که ارتفاعشان از سطح دریا کمتر از ۴۷۵ متر است، درصد بسیار کمی از سطح کل کشور را تشکیل می‌دهد [۱۵]. بررسی‌های اخیر انجام‌شده بین سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۱۴ نشان می‌دهد که از ۳۱ گروه اقلیمی شناسایی شده توسط کوپن-گایگر، ایران ۹ گروه از آنها را در بر می‌گیرد (رجوع کنید به شکل ۱). بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن

1. mean radiant temperature (MRT)
2. Effective temperature index (ET^*)

جدول ۱. ویژگی های دمایی شهرهای منتخب برای آنالیز [۸].

Table 1. Temperature characteristics of the cities selected for analysis.

شهر	میانگین دمای خشک زمستانی °C	میانگین رطوبت نسبی زمستان %	میانگین دمای خشک تابستانی °C	میانگین رطوبت نسبی تابستان %
یزد (Bwh)	۱۰	۴۰	۲۷	۱۸
خرم آباد (CSa)	۶/۵	۶۵/۵	۲۲/۵	۳۱/۶
مشهد (BSk)	۷/۳۳	۶۰/۶۷	۲۲/۶۷	۳۲
سبزوار (BSH)	۹	۵۳/۸	۲۵/۵	۲۷/۸
رشت (Cfa)	۹/۸	۸۵/۳۳	۲۲/۵	۸۱
کرمان (Bwk)	۸/۶	۴۵/۳۳	۲۳/۱۶	۲۱/۳۳
اردبیل (scb)	۶/۵	۷۰	۱۳	۶۴
همدان - نوژه (dsa)	-۴	۶۳	۳/۳۳	۳۶/۶
آبعلی (dsb)	۲	۵۸/۶۶	۱۷/۶۶	۳۵



شکل ۲. فلوچارت مراحل انجام پژوهش.

Fig. 2. Flowchart of research steps.

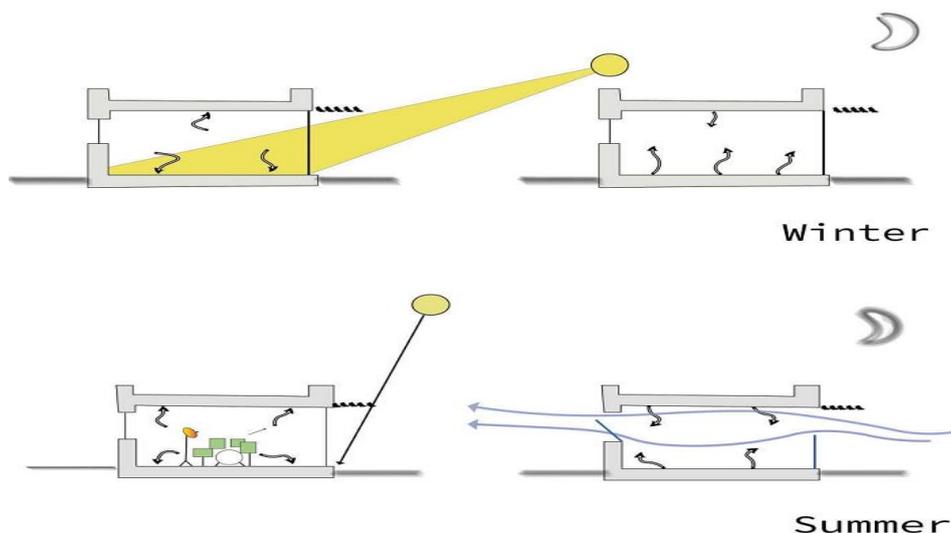
شده است که این فرمتها در سایت‌هایی همانند انرژی پلاس برای شرایط آب و هوایی شهرهای ایران و دیگر نقاط جهان قابل استخراج است. با وارد کردن فایل‌های آب و هوایی شهرهای منتخب در نرم‌افزار مشاوره آب و هوایی نمودارهای اقلیمی رسم و تحلیل آن با استفاده از نرم‌افزار کلاسیک کانسالتنت انجام شده است. در این پژوهش از مدل آسایش حرارتی استاندارد اشری ۵۵ بر اساس دمای حباب خشک، سطح لباس، فعالیت متابولیک، سرعت هوا، رطوبت، و میانگین دمای تابشی استفاده شده است. در جدول ۱ ویژگی ایستگاه‌های هواشناسی شهرهای منتخب برای اقلیم کوپن - گایگر برای انجام آنالیز ارائه شده است.

در شکل ۲ فلوچارت مراحل انجام پژوهش نشان داده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که ابتدا فایل آب و هوایی هر شهر - ایستگاه به طور جداگانه وارد نرم‌افزار شده و بعد از استخراج نتایج تحلیل و مقایسه شهرها انجام شد. در این مقاله مدل پی‌ام‌وی استاندارد اشری ۵۵ انتخاب شده است.

۵- نتایج و بحث

دفترچه راهنمای فنی دولت استرالیا در ساختمان مسکونی توصیه می‌کند که در جاهایی که تغییرات روزانه ۷ تا ۱۰ درجه سلیسیوس وجود دارد، جرم حرارتی مفید است و در جایی که تغییرات روزانه بیش از ۱۰ درجه است. پذیرش جرم حرارتی «بسیار مطلوب» است. مؤسسه سلطنتی معماران بریتانیا

در مرکز پایداری آنلاین خود نیز دمای ۵ تا ۷ درجه سلیسیوس را پیشنهاد می‌کند [۱۶-۱۸]. از نقطه نظر دقیق، قانون اصلی این است که هر چه محدوده دمایی روزانه بیشتر باشد، مقدار جرم حرارتی مورد نیاز برای کاهش



شکل ۳. جهت قرارگیری جرم حرارتی در فصل‌های مختلف [۱۶].

Fig. 3. Direction of thermal mass in different seasons.

در مطالعه حاضر ۹ نوع اقلیم ایران برحسب روش کوپن - گایگر مورد توجه قرار گرفتند که این اقلیم‌ها به صورت زیر می‌باشند:

۱- اقلیم BWH شامل شهرهای سیستان و بلوچستان، یزد، هرمزگان، قسمتهایی از استان سمنان، اصفهان، قم، اهواز، قسمتهایی از استان خراسان جنوبی، قسمتهایی از استان فارس و غیره می‌باشد که ایستگاه یزد را معرف اقلیم BWH در نظر گرفته شده است.

۲- اقلیم BSk شهرهای خراسان رضوی و شمالی، آذربایجان شرقی و غربی و غیره می‌باشد که ایستگاه مشهد معرف اقلیم BSk است.

۳- شهرهایی مانند یاسوج، سبزوار و دامنه جنوبی زاگرس در استان خوزستان، فارس و بوشهر و قسمت کوچکی از استان گلستان در شمال شرق ایران در منطقه BSh قرار دارند. ایستگاه سبزوار معرف اقلیم BSh در نظر گرفته شده است.

۱- شهر کرمان نماینده اقلیم Bwk می‌باشد.

۲- اقلیم Cfa شامل شهرهای رشت، آستارا، رامسر و انزلی است که ایستگاه رشت معرف و نماینده اقلیم sfa می‌باشد.

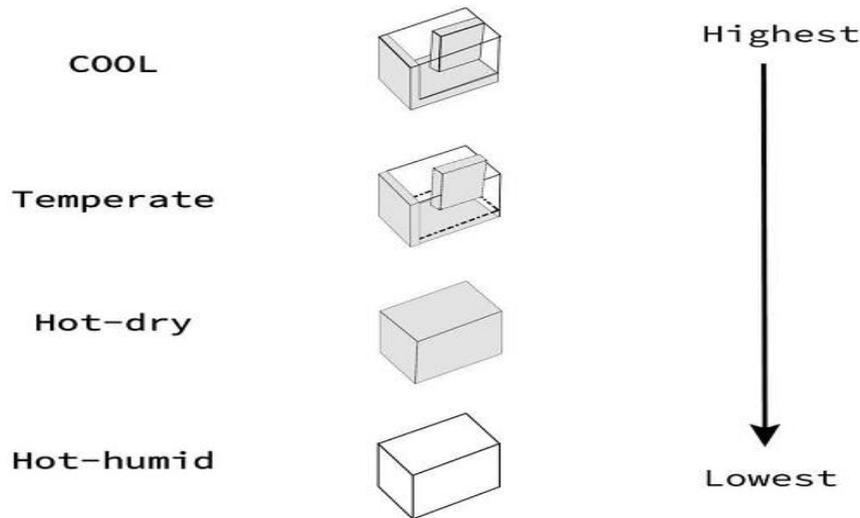
۳- اقلیم sca شامل شهرهای گرگان، ساری، کردستان، بخشهایی از آذربایجان شرقی، ارومیه و پیرانشهر، خرم آباد، ایلام، کرمانشاه، مرکزی، چهارمحال بختیاری بجز شهرکرد و همدان می‌باشد که ایستگاه خرم‌آباد معرف و نماینده اقلیم sca در نظر گرفته شد.

۴- استان اردبیل و مشکین شهر نماینده اقلیم scb می‌باشد.

تغییرات دما بیشتر می‌شود. خواص نگهداری و پایداری دما، جرم حرارتی باید در اقلیم‌هایی که اختلاف دمای روزانه بیش از ۶ درجه وجود دارد یا در آب و هوای سرد^۱ یا خنک^۲ استفاده شود. جرم حرارتی باید هم در معرض نور خورشید و هم در معرض گرمای داخلی افراد و تجهیزات قرار گیرد. از نظر داخلی، برای حداکثر اثربخشی، سطح در معرض یک طبقه با جرم حرارتی بالا باید حدود شش برابر مساحت پنجره‌ای باشد که آن را در معرض نور خورشید قرار می‌دهد [۱، ۱۹، ۲۰]. شکل ۳ جهت مناسب قرارگیری جرم حرارتی در فصل زمستان و تابستان را نشان می‌دهد.

استفاده از جرم حرارتی سنگین یا سبک به شرایط آب و هوایی اقلیم و عملکرد ساختمان بستگی دارد. در مکان‌های گرم و خشک، جرم حرارتی در دیوارها و سقف‌ها برای متعادل کردن اختلاف‌های بزرگ دمای روزانه مورد نیاز است. در مناطق خنک و معتدل، جرم حرارتی به ویژه در دیوارهای رو به غرب، که در معرض بیشترین تابش خورشیدی هستند، مفید است. برای زمستان‌های طولانی‌تر و خنک‌تر (و تابستان‌های طولانی‌تر و گرم‌تر) و در آب و هوای سرد، جرم حرارتی داخلی نیز مفید است. در مکان‌های گرم و مرطوب، ساختار با وزن سبک ترجیح داده می‌شود. به غیر از مکان‌های گرم و مرطوب، معمولاً ترکیبی از ساختمان‌های سنگین و سبک استفاده می‌شود [۸، ۲۱، ۲۲]. شکل ۴ استفاده از جرم حرارتی با وزن سنگین یا سبک در شرایط آب و هوایی اقلیم‌های مختلف را نشان می‌دهد.

1. cold
2. cool



شکل ۴. استفاده از جرم حرارتی با وزن سنگین یا سبک در شرایط آب و هوای مختلف [۱۶].

Fig. 4. Using heavy or light weight thermal mass in different climate conditions.

به نوسانات دمای روزانه پایین تبدیل می‌شود، بنابراین ساختمان در دمای بالا در روز بسته می‌شود و در آسایش قرار می‌گیرد. در زمستان نیز برخی از اثرات مثبت گرمایش ساختمان‌های با جرم بالا وجود دارد، به شرطی که دمای هوای بیرون در روز به منطقه آسایش برسد. توجه داشته باشید که این امر در صورتی آشکارتر می‌شود که دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی^۳ (آفتاب زمستانی^۴) مطابق با استراتژی‌های شکل ۵ به داخل برسد.

جرم حرارتی بالا به تهویه شبانه نیاز دارد و همچنین جرم حرارتی نمی‌تواند خود را از انتشار گرما متوقف کند. پس از یک روز جذب گرما، از خورشید و منابع داخلی مانند افراد و تجهیزات، لازم است آن را با هوای خنک‌تر شبانه شستشو دهد. تهویه شبانه نیاز به منافذ دارد و اینها باید با در نظر گرفتن امنیت آب و هوایی طراحی شوند [۲۳-۲۵].

۵-۲- نتایج اقلیم BSk

ایستگاه مشهد معرف اقلیم نیمه بیابانی سرد BSk و ایستگاه کرمان از اقلیم بیابانی سرد BwK برخوردار هستند. شکل ۶ نتایج اقلیم مشهد را نشان می‌دهد. در اقلیم نیمه بیابانی سرد BSk و اقلیم بیابانی سرد BwK شرایط آسایش در حدود ۲۰ درصد ایام سال برقرار می‌باشد. با توجه به شکل ۵ جرم حرارتی بالا با منطقه شستشو در شب^۵ از ماههای می (خرداد) تا سپتامبر

۵- اقلیم dsa شامل شهرکرد و تالش می‌باشند. ایستگاه همدان- نوزه نماینده اقلیم dsa در نظر گرفته شده است.

۶- ایستگاه ابعلی نماینده اقلیم dsb می‌باشد. جدول ۲ نتایج میانگین سالانه آسایش حرارتی، جرم حرارتی و دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی در اقلیم شهرهای مختلف ایران را نشان می‌دهد.

۵-۱- نتایج اقلیم Bwh

اقلیم غالب در کشور ایران اقلیم بیابانی BW و نیمه بیابانی BS است و اقلیم معتدل به بخشی از زاگرس و دامنه‌های شمالی البرز محدود می‌شود. ایستگاه یزد نماینده اقلیم بیابانی گرم BWh است. شهرهای زاهدان، قم، اصفهان، بندرعباس، اهواز، بندر لنگه، آبادان، کاشان و غیره در اقلیم BWh قرار دارند. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که در این اقلیم شرایط آسایش به طور میانگین در ۲۰ درصد اوقات سال فراهم است. در این اقلیم در ماههای می و سپتامبر بیشترین تاثیر جرم حرارتی در آسایش حرارتی را دارد و مقدار آسایش به ۶۵ درصد می‌رسد. فصل تابستان، در آب و هوای گرم و خشک استفاده از جرم حرارتی بالا در فضای داخلی یک استراتژی مناسب برای طراحی خنک‌کنندگی است. این به ذخیره حرارتی و تأخیر زمانی^۱ و اثرات میرایی جرم^۲ بستگی دارد. بنابراین نوسانات دمای بالای روزانه در فضای باز

3. Passive Solar Direct Gain

4. winter sun

5. High Thermal Mass with Night Flushing Zone

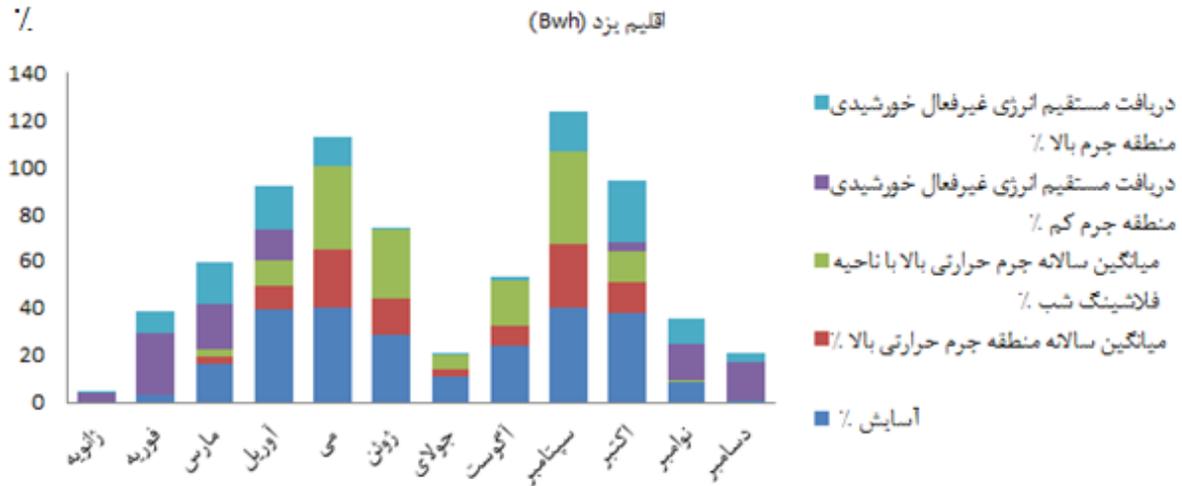
1. time lag

2. damping effects of the mass

جدول ۲. میانگین سالانه نتایج آسایش حرارتی، جرم حرارتی و دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی در اقلیم شهرهای مختلف.

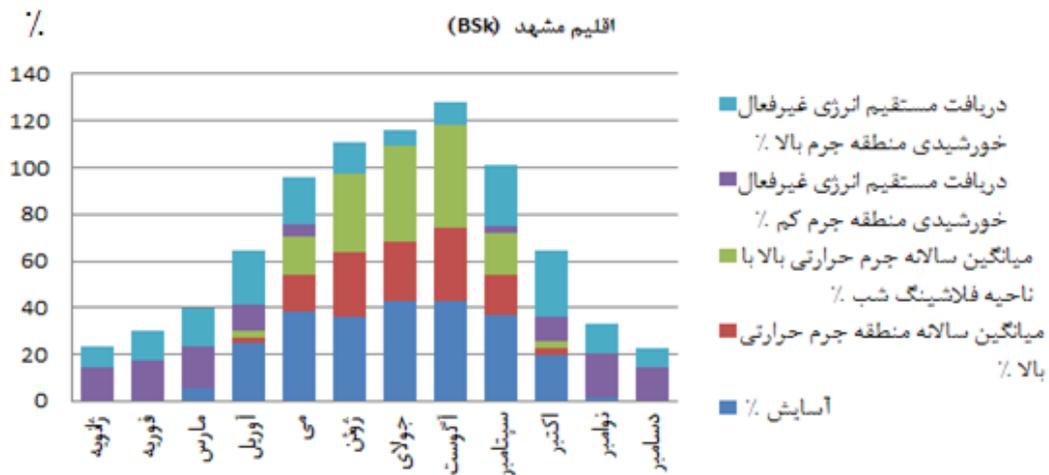
Table 2. Annual average results of thermal comfort, thermal mass, and direct passive solar energy reception in different city climates.

شهر (اقلیم)	آسایش حرارتی درصد (ساعت)	جرم حرارتی درصد (ساعت)	جرم حرارتی با فلاشینگ درصد (ساعت)	غیرفعال خورشیدی درصد (ساعت)
یزد (Bwh)	۲۰/۹ (ساعت ۱۸۲۷)	۸/۸ (ساعت ۷۷۲)	۱۳/۱ (ساعت ۱۱۴۹)	۸/۱ (ساعت ۷۱۲)
آبادان (Bwh)	۱۸/۹ (ساعت ۱۶۵۲)	۷ (ساعت ۶۱۰)	۱۱/۳ (ساعت ۹۹۰)	۷ (ساعت ۶۱۱)
آستارا (Cfa)	۸/۵ (ساعت ۷۴۳)	۰/۲ (ساعت ۱۴)	۰/۲ (ساعت ۲۰)	۱۷/۶ (ساعت ۱۵۴۵)
رشت (Cfa)	۵/۶ (ساعت ۴۸۹)	۰/۳ (ساعت ۲۷)	۰/۴ (ساعت ۳۱)	۱۲/۱ (ساعت ۱۰۵۷)
رامسر (Cfa)	۳/۶ (ساعت ۳۱۷)	۰/۱ (ساعت ۵)	۰/۱ (ساعت ۹)	۱۴ (ساعت ۱۲۲۹)
انزلی (Cfa)	۳/۶ (ساعت ۳۱۲)	۰/۱ (ساعت ۶)	۰/۱ (ساعت ۹)	۱۲/۱ (ساعت ۸۹۴)
اردبیل (sch)	۱۰/۴ (ساعت ۹۰۹)	۰/۹ (ساعت ۷۷)	۱ (ساعت ۸۴)	۲۰/۸ (ساعت ۱۸۲۱)
آبعلی (dsb)	۱۶/۵ (ساعت ۱۴۴۳)	۱/۵ (ساعت ۱۳۵)	۱/۷ (ساعت ۱۵۰)	۱۹/۱ (ساعت ۱۶۷۰)
مشهد (BSk)	۲۰/۷ (ساعت ۱۸۱۴)	۱۰/۵ (ساعت ۹۱۸)	۱۳/۳ (ساعت ۱۱۶۷)	۹/۳ (ساعت ۸۱۱)
ساری (sca)	۶/۷ (ساعت ۵۸۵)	۱/۲ (ساعت ۱۰۲)	۱/۳ (ساعت ۱۱۳)	۱۲/۲ (ساعت ۱۰۶۷)
سبزوار (BSH)	۲۰ (ساعت ۱۷۵۶)	۱۰/۱ (ساعت ۸۸۲)	۱۵/۲ (ساعت ۱۳۲۸)	۱۰/۸ (ساعت ۹۵۰)
همدان - نوژه (dsa)	۱۴/۴ (ساعت ۱۲۶۳)	۸/۸ (ساعت ۷۷۳)	۱۰ (ساعت ۸۸۰)	۱۲/۸ (ساعت ۱۱۲۲)
تبریز (BSk)	۱۷/۸ (ساعت ۱۵۵۶)	۷ (ساعت ۶۰۹)	۷/۸ (ساعت ۶۸۳)	۳/۲ (ساعت ۲۸۴)
یاسوج (BSH)	۱۳/۳ (ساعت ۱۱۶۹)	۱۱/۲ (ساعت ۹۸۰)	۱۲/۳ (ساعت ۱۰۸۰)	۱۷/۶ (ساعت ۱۵۴۳)
خرم آباد (sca)	۱۳/۷ (ساعت ۱۱۹۸)	۹/۷ (ساعت ۸۵۲)	۱۷/۴ (ساعت ۱۵۲۵)	۱۴/۷ (ساعت ۱۲۸۹)
سنندج (sca)	۱۵/۶ (ساعت ۱۳۶۸)	۸/۹ (ساعت ۷۷۷)	۱۳/۷ (ساعت ۱۱۹۸)	۱۲/۵ (ساعت ۱۰۹۱)
کرمان (Bwk)	۱۹/۹ (ساعت ۱۷۴۱)	۱۲/۱ (ساعت ۱۰۵۷)	۱۷/۵ (ساعت ۱۵۲۹)	۱۴/۲ (ساعت ۱۲۴۵)
کرمانشاه (sca)	۱۶/۸ (ساعت ۱۴۷۳)	۹/۴ (ساعت ۸۲۰)	۱۵/۹ (ساعت ۱۳۹۶)	۱۱/۳ (ساعت ۹۹۳)
تهران (BSk)	۲۱/۷ (ساعت ۱۹۰۱)	۷/۷ (ساعت ۶۷۱)	۱۰/۸ (ساعت ۹۴۴)	۱۰/۱ (ساعت ۸۸۲)
زاهدان (Bwh)	۲۳/۴ (ساعت ۲۰۴۹)	۱۲/۲ (ساعت ۱۰۶۵)	۱۹/۴ (ساعت ۱۶۹۶)	۱۰/۵ (ساعت ۹۱۸)
ارومیه (sca)	۱۶/۲ (ساعت ۱۴۲۱)	۶/۱ (ساعت ۵۳۵)	۶/۲ (ساعت ۵۴۷)	۱۷ (ساعت ۱۴۸۵)
همدان (BSk)	۱۴/۵ (ساعت ۱۲۷۰)	۹ (ساعت ۷۸۶)	۱۰ (ساعت ۸۷۴)	۱۱/۹ (ساعت ۱۰۴۳)
زنجان (BSH)	۱۴/۹ (ساعت ۱۳۰۴)	۶/۹ (ساعت ۶۰۲)	۷/۱ (ساعت ۶۲۰)	۱۵/۱ (ساعت ۱۳۲۴)
اهواز (Bwh)	۱۷/۲ (ساعت ۱۵۰۹)	۶/۳ (ساعت ۵۵۰)	۹/۸ (ساعت ۸۵۷)	۶/۴ (ساعت ۵۶۳)
بندرعباس (Bwh)	۱۱/۴ (ساعت ۱۰۰۲)	۲/۳ (ساعت ۲۰۲)	۳ (ساعت ۲۶۵)	۲/۴ (ساعت ۲۱۳)
اصفهان (Bwh)	۱۸/۷ (ساعت ۱۶۴۱)	۱۰/۷ (ساعت ۹۴۱)	۱۶/۲ (ساعت ۱۴۱۶)	۱۳/۷ (ساعت ۱۱۹۶)
شیراز (BSH)	۲۱/۱ (ساعت ۱۸۴۷)	۱۱/۶ (ساعت ۱۰۱۷)	۱۸/۶ (ساعت ۱۶۲۷)	۱۱/۲ (ساعت ۹۷۷)
شهرکرد (dsa)	۱۳/۷ (ساعت ۱۱۹۸)	۷/۹ (ساعت ۶۹۳)	۸/۴ (ساعت ۷۳۸)	۱۹ (ساعت ۱۶۶۴)
بوشهر (Bwh)	۱۲/۴ (ساعت ۱۰۸۹)	۰/۴ (ساعت ۳۳)	۰/۵ (ساعت ۴۵)	۶/۳ (ساعت ۵۵۵)
بیرجند (BSk)	۱۹/۶ (ساعت ۱۷۱۳)	۱۱ (ساعت ۹۶۶)	۱۳/۹ (ساعت ۱۲۱۷)	۱۳/۷ (ساعت ۱۱۹۶)
بجنورد (BSk)	۲۱/۱ (ساعت ۱۸۵۱)	۹/۳ (ساعت ۸۱۶)	۱۳/۳ (ساعت ۱۱۶۶)	۱۱/۳ (ساعت ۹۹۴)
کرج (BSk)	۱۸/۲ (ساعت ۱۵۹۵)	۹/۷ (ساعت ۸۵۱)	۱۳/۵ (ساعت ۱۱۸۲)	۱۶/۲ (ساعت ۱۴۱۸)
سمنان (Bwk)	۲۰/۶ (ساعت ۱۸۰۲)	۷/۶ (ساعت ۶۶۳)	۱۱ (ساعت ۹۶۲)	۱۳/۳ (ساعت ۱۱۶۶)



شکل ۵. نتایج اقلیم یزد BWh.

Fig. 5. Yazd BWh climate results.



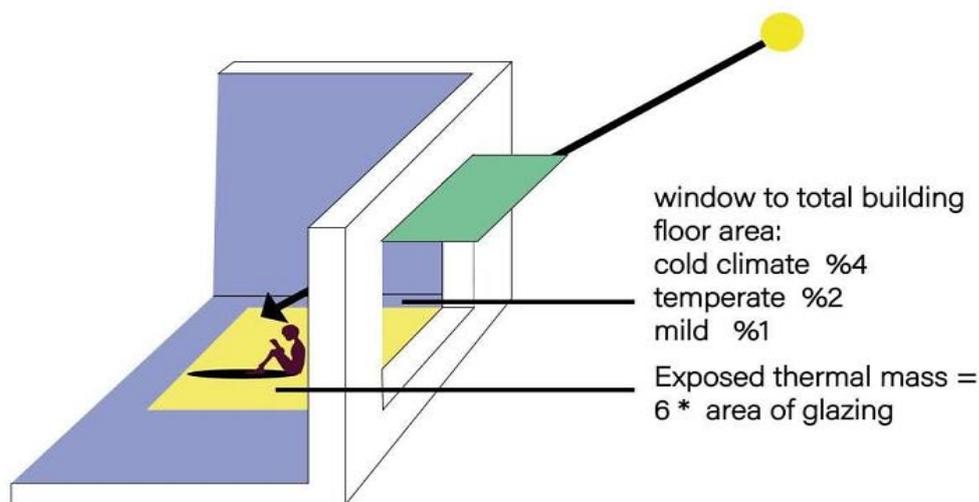
شکل ۶. نتایج اقلیم BSk.

Fig. 6. BSk climate results.

انرژی غیرفعال خورشیدی^۱ نشان می‌دهد در فصل زمستان مقدار دریافت انرژی غیرفعال خورشیدی برای مشهد ۱۰ تا ۱۵ درصد و کرمان ۲۰ تا ۲۵ درصد به آسایش اضافه می‌کند. اگر ساختمان دارای مقدار مناسبی از شیشه‌های رو به خورشید باشد، گرمایش غیرفعال خورشیدی می‌تواند دمای داخلی را افزایش دهد. توجه داشته باشید که نرم‌افزار کلاسیک کانسالتنت فرض می‌کند که سایه‌زنی تمام بهره‌گیری مستقیم خورشیدی را در مواقعی

(مهر) در اقلیم نیمه بیابانی سرد BSk ایستگاه مشهد ۵۰ تا ۷۰ درصد و اقلیم بیابانی سرد BWh ایستگاه کرمان بین ۶۰ تا ۷۵ درصد به درصد آسایش ساختمان کمک می‌کند. در تابستان، در آب و هوای گرم و خشک، استفاده از جرم حرارتی بالا در فضای داخلی یک استراتژی طراحی خنک کننده خوب است، به خصوص زمانی که از تهویه طبیعی یا یک پنکه کل خانه برای وارد کردن هوای خنک شبانه استفاده می‌شود و سپس ساختمان در طول گرمای روز بسته می‌شود. همچنین در شکل ۶ منطقه جرم پایین با دریافت مستقیم

1. Passive Solar Direct Gain Low Mass Zone



شکل ۷. جهت قرارگیری ساختمان در ترکیب جرم حرارتی با دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی [۱۶].

Fig. 7. Orientation of the building in the thermal mass combination with direct passive solar energy reception.

در نمای مخالف هستند. شکل ۷ جهت قرارگیری ساختمان در ترکیب جرم حرارتی با دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی را نشان می‌دهد.

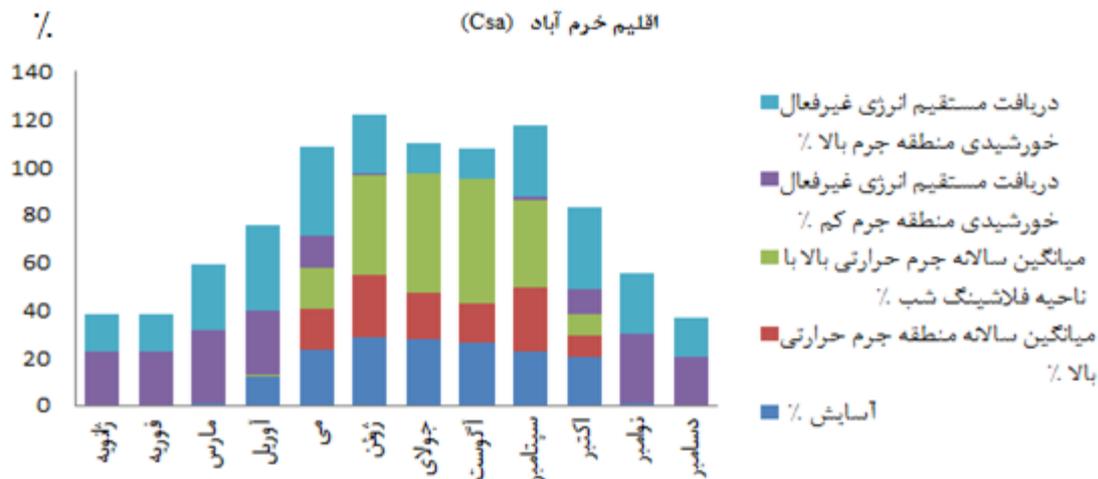
۵-۳- نتایج اقلیم SCA

ایستگاه خرم‌آباد معرف اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم SCA است که بخش زیادی از زاگرس، البرز و ناحیه خزری را در بر می‌گیرد. شهرهای ساری، ایلام، همدان، سنندج، کرمانشاه، اراک و ارومیه در این اقلیم قرار دارند و شکل ۸ نتایج آن را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در اقلیم SCA به طور طبیعی شرایط آسایش میانگین در حدود ۱۵ درصد ایام سال فراهم است و در این اقلیم می‌توانیم با استفاده از جرم حرارتی در تابستان بین ۴۰ تا ۵۰ درصد و دریافت غیرفعال انرژی خورشیدی در زمستان بین ۳۵ تا ۵۰ درصد در این اقلیم به شرایط آسایش کمک کرد. جرم حرارتی دما را ثابت نگه می‌دارد در آب و هوای معتدل، استفاده اصلی از جرم حرارتی، خنثی کردن تغییرات دمایی روزانه است که در نتیجه یک محیط حرارتی داخلی پایدار است. این کار را با جذب گرمای به دست آمده، به طور مستقیم یا غیرمستقیم از خورشید و از منابع داخلی مانند ساکنین و تجهیزات انجام می‌دهد و آن را به آرامی در طول دوره خنک‌تر یک شبه آزاد می‌کند. با کاهش سرعت عبور گرما توسط جرم حرارتی، ممکن است یک فاصله زمانی مثلاً ۱۲ ساعته بین حداکثر دمای بیرون و حداکثر دمای داخلی تجربه شود. بنابراین می‌توان بالاترین دمای داخلی را طوری طراحی

که به آن نیاز نیست مسدود می‌کند. خطر این است که اگر این ساختمان یک ساختمان کم جرم باشد، این بهره خورشیدی بدون سایه ممکن است به سرعت فضا را بیش از حد گرم کند. در کلاسیمنت کانسالتنت این منطقه با نیاز به حداقل زاویه تشعشع^۱ (یا تابش عمودی مستقیم^۲) در طول یک ساعت تعریف می‌شود که افزایش دما ۵/۶ درجه سلیسیوس برابر با ۱۵۷/۵ وات ساعت بر متر مربع خواهد بود. همچنین این منطقه یک تاخیر زمانی حرارتی نسبتاً کم را برای ساختمان‌های با جرم کم در حدود ۳ ساعت در نظر می‌گیرد، به این معنی که تابش ۳ ساعت قبل از ساعت فعلی اندازه‌گیری می‌شود.

ترکیب جرم حرارتی با دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی مزایای بسیار زیادی دارد. استفاده از فضاهای اشغالی به عنوان سیستم گرمایش غیرفعال یک ساختمان یک استراتژی موثر به ویژه در ترکیب با جرم حرارتی است. خورشید باید در طول فصل گرمایش اجازه ورود به ساختمان را داشته باشد، پنجره‌ای که در ۳۰ درجه جنوبی (شمالی در نیمکره جنوبی) قرار دارد این کار را انجام می‌دهد و هنگامی که با گرمای داخلی مانند گرمای ناشی از افراد و تجهیزات و با سیستم بازایی گرم، یک ساختمان ممکن است به طور غیرفعال برای بیشتر یا تمام زمستان گرم شود. بنابراین ساختمان‌های سازگار با آب و هوا در آب و هوای سرد، به دنبال بهره‌برداری از پنجره‌های خورشیدی جهت بهره‌برداری مستقیم خورشیدی و به حداقل رساندن دهانه‌ها

1. Beam Radiation
2. Direct Normal Radiation



شکل ۸. نتایج اقلیم Sca.

Fig. 8. Sca climate results.

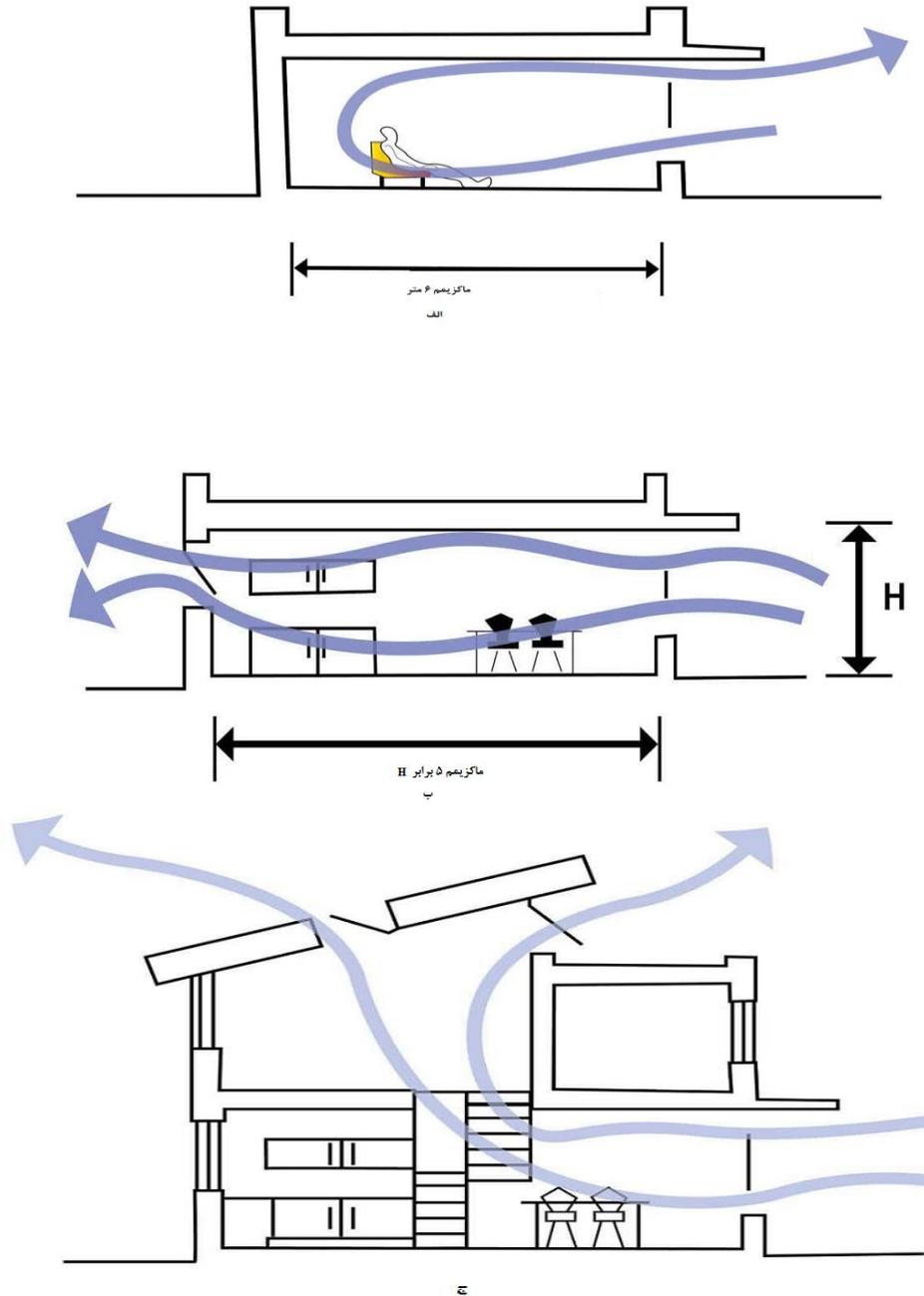
تهویه شود. تهویه متقاطع (شکل ۹ ب) به اختلاف فشار بین جهت بادگیر و ساختمان بستگی دارد. تا زمانی که عمق فضا بیش از پنج برابر ارتفاع آن نباشد کار خواهد کرد. برای اینکه تهویه متقاطع کار کند باید باد وجود داشته باشد و هر دو دهانه ورودی و خروجی باید حداقل ۵ درصد از سطح زمین بالاتر باشند. تهویه دودکشی (شکل ۹ ج) که بر شناور بودن هوا متکی است، هر زمان که اختلاف دمایی بیش از ۲ درجه سانتیگراد بین بیرون و داخل وجود داشته باشد، کار می‌کند.

۵-۴- نتایج دیگر اقلیم‌های نه‌گانه

در شکل ۱۰ نتایج مقایسه‌ای پارامترهای مختلف شرایط آسایش، جرم حرارتی، و دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی، در اقلیم‌های ۹گانه نشان داده شده است. نتایج اقلیم CFa اقلیم رشت نشان می‌دهد شرایط آسایش در این اقلیم در حدود ۵ درصد می‌باشد. در این اقلیم جرم حرارتی کمترین تاثیر در افزایش آسایش راحتی را دارد. در ماههای زمستان افزایش دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی ۱۵ تا ۲۰ درصد به آسایش حرارتی کمک می‌کند. ایستگاه سبزوار معرف اقلیم نیمه بیابانی گرم BSh است. شرایط آسایش در این اقلیم در حدود ۲۰ درصد می‌باشد. در تابستان و ماههای گرم به کمک جرم حرارتی در حدود ۶۰ درصد بهبود می‌یابد. همچنین در زمستان به کمک دریافت مستقیم

کرد که در زمانی که ساختمان خالی است یا در جایی که می‌توان از تهویه شبانه استفاده کرد، رخ دهد.

جرم حرارتی بالا نیاز به تهویه شبانه دارد تحقیقات انجام شده توسط گیوانی که در خنک‌سازی غیرفعال و انرژی ساختمان‌های با مصرف کم، نشان می‌دهد که حداکثر دمای داخلی ساختمانی که جرم آن در شب سرد می‌شود، نسبت به همان ساختمان بدون کمک خنک‌کننده شبانه ممکن است ۳ درجه سلیسیوس کمتر از دمای هوا باشد. با حداکثر دمای بیرونی ۳۶ درجه سلیسیوس که به طور بالقوه به معنای حداکثر دمای محیط داخلی ۲۷/۵ درجه سلیسیوس است. در مناطق خشک و بیابانی دمای داخلی ممکن است ۶ تا ۸ درجه سلیسیوس کمتر از حداکثر دمای بیرون باشد. بنابراین منافذ باید طوری طراحی شوند که هوای خنک شبانه بتواند جرم حرارتی در معرض دید را «شستشو» کند، و گیوانی نمونه‌هایی از چگونگی به حداکثر رساندن اثر تهویه شبانه با طراحی دهانه‌ها را نشان می‌دهد. در مناطق آب و هوایی که دمای بالای روز در تابستان فضای داخلی را خارج از منطقه آسایش قرار می‌دهد، تهویه شبانه موثرتر از تهویه در روز برای آسایش خواهد بود. برای فضاهایی که فقط از یک طرف به بیرون دسترسی دارند، تهویه یک طرفه (شکل ۹ الف) تا حداکثر عمق اتاق ۶ متر کار می‌کند. معمولاً از پنجره بازشونده استفاده می‌شود زیرا می‌تواند تهویه و نور روز را تأمین کند. طراحی باید طوری باشد حداقل ۵ درصد از سطح زمین تهویه شود و در آب و هوای گرم یا مکان‌هایی با سرعت باد کم، به میزان قابل توجهی بیشتر از آن

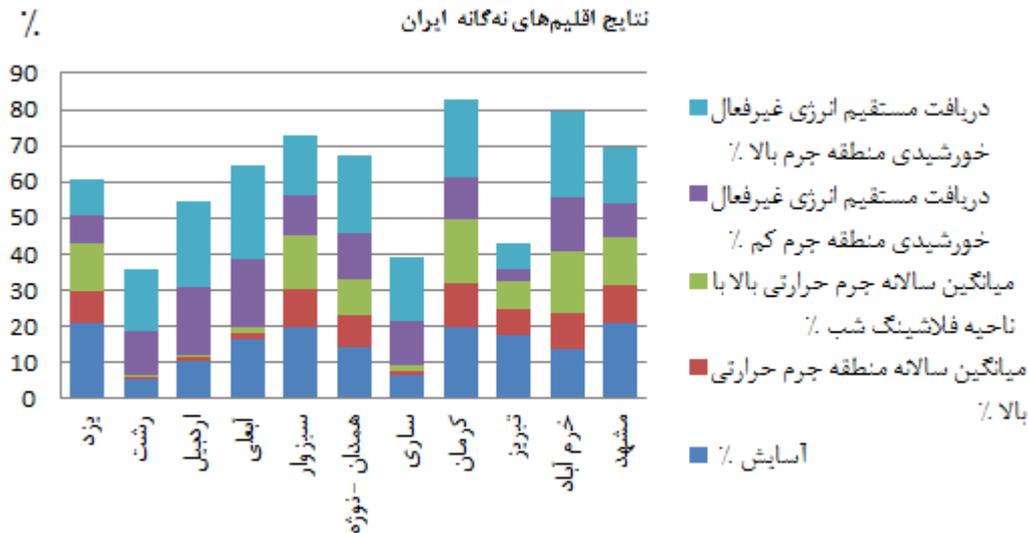


شکل ۹. الف. تهویه یک طرفه، ب. تهویه متقاطع و ج. تهویه دودکشی [۱۶].

Fig. 9. One-way ventilation, B. Cross ventilation, and C. Chimney ventilation.

همچنین اقلیم‌های معتدل کشور ایران مانند اقلیم معتدل با تابستان خشک و گرم Csb یعنی ایستگاه مشکین شهر و اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم Dsa یعنی ایستگاه همدان - نوژه و ایستگاه ابعلی معرف اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و گرم Dsb می باشند که وسعت این اقلیم‌ها در ایران محدود است. نتایج این اقلیم‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. از جدول ۵ اقلیم Dsa یعنی ایستگاه همدان - نوژه مشخص

انرژی غیرفعال خورشیدی ۲۰ تا ۲۵ درصد شرایط آسایش افزایش می‌یابد. همچنین اقلیم‌های معتدل کشور ایران مانند اقلیم معتدل با تابستان خشک و گرم Csb یعنی ایستگاه اردبیل و اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم Dsa یعنی ایستگاه همدان - نوژه و ایستگاه ابعلی معرف اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و گرم Dsb می‌باشند که وسعت این اقلیم‌ها در ایران محدود است. نتایج این اقلیم‌ها در جدول ۵ و شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. نتایج اقلیم‌های نه‌گانه ایران.

Fig. 10. Results of the nine climates of Iran.

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، تعداد توافقات با پارامترهای طراحی پیشنهادی بسته به منطقه آب و هوایی متفاوت است. یزد به عنوان شهری که در آب و هوای خشک واقع شده است، شهری است که بیشترین تعداد توافقات با پارامترهای طراحی پیشنهادی را دارد و این تعداد برای تبریز و ساری کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که نرم‌افزار کلاسیمنت کانسالتنت فقط پارامترهایی را که بر شرایط حرارتی داخلی تأثیر می‌گذارد، در نظر می‌گیرد و سایر عوامل محیطی، مانند وقوع طوفان‌های شن که یک نگرانی اساسی در یزد است را در نظر نمی‌گیرد.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش طراحی تأثیر جرم حرارتی و دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی بررسی شده است. برای ۹ اقلیم از ۳۱ اقلیم شناسایی شده توسط کوپن - گایگر برای کشور ایران را که شامل اقلیم‌های، BSk، BSh، BWk، CSa و CSb، CFa، DSa، DSb می‌باشد، شرایط آسایش حرارتی مورد مطالعه قرار گرفت. با وارد کردن داده‌های آب و هوایی با فرمت EPW در نرم‌افزار کلاسیمنت کانسالتنت و استفاده از استاندارد اشری ۵۵ و مدل پی‌ام‌وی در نرم‌افزار مشاوره آب و هوایی استفاده شد. نتایج خروجی شهرها شامل جرم حرارتی، دریافت مستقیم انرژی غیرفعال خورشیدی و همچنین نتایج شرایط آسایش

می‌شود که ۱۴/۴ درصد از مواقع سال در محدوده آسایش قرار دارد و می‌توانیم با سایه‌اندازی بر پنجره‌ها ۱۰/۶ درصد، افزایش حرارت داخلی ۲۳/۷ درصد و استفاده از انرژی غیرفعال خورشیدی ۱۲/۸ درصد این محدوده آسایش را گسترش دهیم. ایستگاه اَبلی معرف اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و گرم Dsb با سایه‌اندازی بر پنجره‌ها فقط ۵/۳ درصد، سرمایه‌ش تبخیری ۱/۸ درصد، افزایش حرارت داخلی ۲۴/۷ درصد و استفاده از انرژی غیرفعال خورشیدی ۱۹/۱ درصد این محدوده آسایش را گسترش دهیم. در جدول ۳ دیگر پارامترهای استراتژی‌های طراحی در اقلیم‌های مختلف ارایه شده است. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، تعداد توافقات با پارامترهای طراحی پیشنهادی بسته به منطقه آب و هوایی متفاوت است. یزد به عنوان شهری واقع در اقلیم خشک، دارای بیشترین میزان توافق با پارامترهای طراحی پیشنهادی است و این تعداد برای انزلی و اَبلی کاهش می‌یابد.

۶- اعتبارسنجی نتایج

اعتبارسنجی داده‌های بدست آمده با نتایج مرجع [۱۷] به طور کامل تصدیق می‌شود. جدول ۵ نتایج بدست آمده در این تحقیق به همراه مرجع [۱۷] را نشان می‌دهد. در مرجع [۱۷] با نرم‌افزار کلاسیمنت کانسالتنت تأثیر پارامتر جرم حرارتی بر روی ۳ شهر یزد، تبریز و ساری بررسی شده است.

جدول ۳. استراتژی طراحی برای اقلیم های مختلف.

Table 3. Design strategy for different climates.

درصد ایجاد آسایش اقلیم ها									استراتژی طراحی
DSb آبعلی	DSa همدان - نوزه	CSb اردبیل	BWk کرمان	CFa رشت	BSh سبزوار	BSk مشهد	CSa خرم آباد	Bwh یزد	
۱۶/۵	۱۴/۴	۱۰/۴	۱۹/۱	۳/۶	۲۰	۱۷/۴	۱۳/۷	۱۹/۷	محدوده آسایش
۵/۳	۱۰/۶	۳/۷	۱۵/۲	۸/۹	۱۶/۸	۱۳/۳	۱۵/۱	۱۶/۸	سایه انداز پنجره
۱/۵	۸/۸	۰/۹	۱۲/۱	۰/۳	۱۰/۱	۱۰/۵	۹/۷	۸/۸	جرم حرارتی بالا
۱/۷	۱۰	۱	۱۷/۵	۰/۴	۱۵/۲	۱۳/۳	۱۷/۴	۱۳/۱	جرم حرارتی بالا با ناحیه فلاشینگ شب
۱/۸	۱۰	۰/۸	۱۶/۴	۰/۱	۲۲/۵	۱۲/۷	۱۷/۱	۲۵/۸	سرمایش تبخیری
۲۴/۷	۲۳/۷	۲۷/۷	۲۶/۱	۲۲/۹	۲۱/۲	۲۲/۳	۲۲/۲	۲۲/۵	افزایش حرارت داخلی
۱۹/۱	۱۲/۸	۲۰/۸	۱۴/۲	۱۰/۲	۱۰/۸	۱۳/۵	۱۴/۷	۸/۱	استفاده از انرژی غیرفعال خورشیدی
۰	۰	۰	۰	۱۲/۵	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۱	سرمایش با رطوبت گیری
۳۴	۳۵	۳۹	۱۹/۲	۲۷/۴	۲۲/۴	۲۹/۲	۲۶/۶	۲۸/۲	گرمایش با رطوبت زنی
۰	۰/۳	۶/۷	۰/۵	۰/۲	۰/۵	۰/۲	۰/۳	۰/۱	محافظت در برابر باد مزاحم

جدول ۴. تعداد توافقات با پارامترهای طراحی پیشنهادی برای اقلیم های مختلف.

Table 4. Number of agreements with proposed design parameters for different climates.

توافق ✓ یا عدم توافق ✗ نرم افزار برای اقلیم ها									پارامترهای طراحی
DSb آبعلی	DSa همدان - نوزه	CSb اردبیل	BWk کرمان	CFa رشت	BSh سبزوار	BSk مشهد	CSa خرم آباد	Bwh یزد	
✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	محدوده آسایش
✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	جرم حرارتی
✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	سایه انداز پنجره
✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	سرمایش تبخیری
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	افزایش حرارت داخلی
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	استفاده از انرژی غیرفعال خورشیدی
✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	سرمایش با رطوبت گیری
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	گرمایش با رطوبت زنی
✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	محافظت در برابر باد مزاحم

جدول ۵. اعتبارسنجی نتایج.

Table 5. Validation of results.

شهر / پارامتر	شرایط آسایش (درصد)	جرم حرارتی (درصد)	انرژی غیرفعال خورشیدی (درصد)
یزد (نویسندگان)	۲۰/۹	۸/۸	۸/۱
تبریز (نویسندگان)	۱۷/۱	۷	۳/۲
ساری (نویسندگان)	۶/۷	۱/۲	۱۲/۲
یزد [۱۷]	۷/۷	۱۴/۷	۱۷/۴
تبریز [۱۷]	۱۱/۴	۲۰/۸	۹/۹
ساری [۱۷]	۳/۴	۴/۲	۲۸/۴

و راهکارهای تهویه طبیعی با شکل‌ها و جداول مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین نتایج نه‌اقلیم عبارتند از:

۱- تحلیل اقلیم بیابانی گرم (BWh) در ایستگاه یزد نشان می‌دهد که با به‌کارگیری راهکارهای غیرفعال، می‌توان در ۱۸۲۷ ساعت (۲۰٪ از سال) به شرایط آسایش دست یافت؛ که در آن جرم حرارتی سنگین در تابستان تا ۶۵٪ ساعات آسایش را بهبود می‌بخشد و دریافت انرژی خورشیدی مستقیم در زمستان ۱۵ تا ۲۵٪ به آن می‌افزاید. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در طراحی ساختمان‌های این اقلیم از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا (مانند بتن و آجر) همراه با تهویه شبانه استفاده شده و دریافت تابش خورشیدی در فصل سرد به‌طور کنترل‌شده به کار گرفته شود تا کارایی انرژی غیرفعال به‌حداکثر برسد.

۲- براساس تحلیل‌های صورت‌گرفته در اقلیم معتدل با تابستان خشک و گرم (CSa) که ایستگاه خرم‌آباد نماینده آن است، با به‌کارگیری راهکارهای غیرفعال می‌توان در ۱۱۹۸ ساعت (۱۴٪ از سال) به آسایش حرارتی دست یافت؛ که در آن جرم حرارتی متوسط در تابستان تا ۵۰٪ ساعات آسایش را بهبود بخشیده و دریافت کنترل‌شده انرژی خورشیدی در زمستان ۲۰ تا ۲۵٪ بر آن می‌افزاید. با توجه به بارش نسبتاً مناسب و تابستان‌های گرم این اقلیم، پیشنهاد می‌شود جرم حرارتی در عناصر داخلی (مانند کف و پارتیشن) متمرکز شده و از سایه‌بان‌های عمیق برای پنجره‌های جنوبی استفاده گردد تا تعادل

حرارتی به‌صورت غیرفعال برقرار شود.

۳- تحلیل‌های انجام‌شده در اقلیم نیمه‌بیابانی سرد (BSk) با نمایندگی ایستگاه مشهد نشان می‌دهد که با به‌کارگیری راهکارهای غیرفعال، امکان دستیابی به آسایش حرارتی در ۱۸۱۴ ساعت (۲۰٪ از سال) فراهم می‌شود. در این اقلیم، استفاده از جرم حرارتی متوسط در ماه‌های گرم‌سال تا ۵۰٪ بهبود آسایش را به همراه دارد، درحالی‌که دریافت مستقیم انرژی خورشیدی در فصل سرد حدود ۱۵٪ بر میزان آسایش می‌افزاید. با توجه به اثر متعادل هر دو استراتژی، طراحی در این منطقه باید ترکیبی باشد؛ پیشنهاد می‌گردد از جرم حرارتی متوسط همراه با عایق‌کاری مناسب استفاده شده و پنجره‌های جنوبی با سایه‌بان‌های متحرک تجهیز گردند تا تعادل حرارتی در طول سال حفظ شود.

۴- بر اساس تحلیل‌های صورت‌گرفته در اقلیم نیمه‌بیابانی گرم (BSh) با نمایندگی ایستگاه سبزوار، با به‌کارگیری راهکارهای غیرفعال می‌توان در ۱۷۵۶ ساعت (۲۰٪ از سال) به شرایط آسایش حرارتی دست یافت. در این اقلیم، جرم حرارتی متوسط در ماه‌های گرم‌سال تا ۵۰٪ و دریافت انرژی خورشیدی در ماه‌های سرد تا ۲۰٪ بر بهبود آسایش مؤثر هستند. با توجه به الگوی مشابه با اقلیم مشهد (BSk)، طراحی در این منطقه نیز نیازمند رویکرد ترکیبی است؛ پیشنهاد می‌شود از جرم حرارتی متوسط در ترکیب با عایق استفاده شده، اما با تأکید بیشتر بر سایه‌اندازی مؤثر پنجره‌ها به‌ویژه در

در گرم‌ترین ماه‌های سال (جولای و آگوست) تا ۲۳٪ بهبود آسایش را سبب می‌شود، درحالی‌که دریافت انرژی خورشیدی غیرفعال در فصل سرد بین ۱۵ تا ۲۰٪ بر آن می‌افزاید. با توجه به زمستان‌های بسیار سرد و تابستان‌های گرم، طراحی در این منطقه باید اولویت مطلق را بر عایق‌کاری پوسته خارجی قرار داده و از سیستم‌هایی مانند دیوار دپوسته با جرم حرارتی داخلی برای تعادل بخشیدن به نوسانات دمایی شدید فصل‌های مختلف بهره بگیرد.

۸- تحلیل‌های انجام‌شده در اقلیم نیمه‌خشک سرد با تابستان معتدل (DSb) با نمایندگی ایستگاه آبدلی نشان می‌دهد که با به‌کارگیری راهکارهای غیرفعال می‌توان در ۱۴۴۶ ساعت (۱۶/۵٪ از سال) به شرایط آسایش حرارتی دست یافت. در این اقلیم، استفاده از جرم حرارتی در ماه‌های گرم سال تأثیر محسوسی بر بهبود آسایش ندارد؛ در مقابل، بهره‌گیری از انرژی خورشیدی غیرفعال در فصول سرد تأثیر بسیار بالایی در ایجاد آسایش حرارتی ایفا می‌کند. با توجه به زمستان‌های سرد و بارش نسبتاً بالا، طراحی در این منطقه باید کاملاً بر عایق‌کاری فوق‌مقاوم و آب‌بندی پوسته خارجی متمرکز شود و از پنجره‌هایی با ضریب انتقال حرارت بسیار پایین (U-Value) همراه با بهره‌گیری حداکثری از نور و گرمای خورشید در زمستان استفاده نماید، به‌گونه‌ای که گرمایش خورشیدی غیرفعال به عنوان کلید اصلی طراحی در نظر گرفته شود.

این مطالعه با بررسی نه اقلیم متمایز در ایران، نشان می‌دهد که کارایی راهکارهای غیرفعال به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های محلی قرار دارد و یک «الگوی واحد طراحی» در مقیاس ملی نه تنها کارآمد نیست، بلکه ممکن است به اتلاف منابع منجر شود. بر این اساس، سه توصیه کلان ارائه می‌شود: نخست، برای طراحان و معماران، استفاده از چک‌لیست اقلیمی مبتنی بر یافته‌های این پژوهش (مانند جدول ۳ و ۴) در مرحله اولیه مطالعات، جهت انتخاب هدفمند استراتژی‌هایی مانند جرم حرارتی یا دریافت خورشیدی ضروری است. دوم، برای سیاست‌گذاران و تنظیم‌گران مقررات ملی ساختمان، تفکیک دقیق پهنه‌های اقلیمی و تدوین آیین‌نامه‌های اجباری مختص هر منطقه (مثلاً الزام به جرم حرارتی در مناطق بیابانی و تأکید بر عایق و تهویه در مناطق مرطوب) یک گام بلند به سوی بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش ساختمان خواهد بود. سوم، برای پژوهشگران آتی، تمرکز بر توسعه سیستم‌های هیبرید (ترکیب هوشمند غیرفعال و فعال) به‌ویژه در اقلیم‌های با پتانسیل محدود غیرفعال (مانند رشت با تنها ۵.۶٪ آسایش غیرفعال)، به عنوان مسیری ضروری پیشنهاد می‌شود تا شکاف موجود بین معماری پایدار و آسایش کامل در تمامی فصول پر شود.

جهت جنوب، تا از افزایش بار گرمایی ناخواسته در تابستان جلوگیری شود. ۵- تحلیل‌های انجام‌شده در اقلیم معتدل مرطوب (Cfa) با نمایندگی ایستگاه رشت نشان می‌دهد که تنها در ۴۸۹ ساعت (۵/۶٪ از سال) می‌توان با راهکارهای غیرفعال به آسایش حرارتی دست یافت. در این اقلیم، استفاده از جرم حرارتی سنگین تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر بهبود آسایش ندارد؛ با این حال، دریافت مستقیم انرژی خورشیدی در فصول سرد سال می‌تواند بین ۱۵ تا ۲۰٪ بر میزان آسایش بیفزاید. بنابراین طراحی در این منطقه باید بر عایق‌بندی در برابر رطوبت، تهویه طبیعی گسترده (با استفاده از پنجره‌های بزرگ و قابل بازشو) و پیش‌بینی سیستم‌های کنترل رطوبت متمرکز شود و از سرمایه‌گذاری روی جرم حرارتی سنگین خودداری گردد.

۶- تحلیل‌های صورت‌گرفته در اقلیم بیابانی سرد (BWk) با نمایندگی ایستگاه کرمان نشان می‌دهد که با به‌کارگیری راهکارهای غیرفعال می‌توان در ۱۷۴۱ ساعت (۱۹/۹٪ از سال) به شرایط آسایش حرارتی دست یافت. در این اقلیم، جرم حرارتی سنگین در ماه‌های گرم‌سال تا ۶۰٪ ساعات آسایش را بهبود می‌بخشد و دریافت انرژی خورشیدی مستقیم در زمستان حدود ۲۵٪ بر آن می‌افزاید. با توجه به مشابهت کلی با اقلیم یزد (BWh) ولی با زمستان‌های سردتر، طراحی در این منطقه باید بر ترکیب جرم حرارتی سنگین با عایق‌کاری قوی پوسته خارجی تأکید نماید تا تلفات گرمایی در فصل سرد کاهش یابد و از سایه‌اندازی مناسب در تابستان برای جلوگیری از جذب حرارت اضافی اطمینان حاصل شود.

۶- تحلیل‌های انجام‌شده در اقلیم معتدل با تابستان خشک و معتدل (CSb) با نمایندگی ایستگاه اردبیل نشان می‌دهد که تنها در ۱۰٪ از ساعات سال می‌توان با راهکارهای غیرفعال به آسایش حرارتی دست یافت. در این اقلیم، استفاده از جرم حرارتی در ماه‌های گرم‌سال تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر بهبود آسایش ندارد؛ با این حال، بهره‌گیری از انرژی خورشیدی غیرفعال در فصول سرد می‌تواند بیش از ۲۰٪ بر میزان آسایش بیفزاید. بنابراین طراحی در این منطقه باید بر عایق‌کاری حرارتی با مقاومت بالا و بهره‌گیری حداکثری از نور و گرمای خورشید در زمستان متمرکز شود، در حالی که از سرمایه‌گذاری بر جرم حرارتی سنگین برای خنک‌سازی تابستانه خودداری گردد.

۷- تحلیل‌های انجام‌شده در اقلیم نیمه‌خشک سرد با تابستان گرم (DSa) با نمایندگی ایستگاه همدان نشان می‌دهد که با به‌کارگیری راهکارهای غیرفعال می‌توان در ۱۲۶۳ ساعت (۱۴٪ از سال) به شرایط آسایش حرارتی دست یافت. در این اقلیم، جرم حرارتی سبک تا متوسط تنها

- [10] R. Alesci, M. Fiorentini, E. Zanetti, R. Scoccia, Energy flexibility quantification of the building's thermal mass for radiator and floor heating systems, *Energy*, 325 (2025) 135903.
- [11] N. Yoon, W. Wu, Short-term thermal resilience and building energy flexibility using thermal mass and controlled natural ventilation, *Energy and Buildings*, 320 (2024) 114547.
- [12] W. Wu, Q. Xue, J. Zhou, O. Markwell, Z. Sun, A. Aniebietabasi, G. David, Night-time Natural Ventilation of Internal Thermal Mass to Minimise Daytime Overheating Hours in School Buildings, in: 6th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (IC2UHI), 2024.
- [13] J. Yu, Y. Lu, J. Hu, K. Zhong, T. Jia, X. Yang, Prediction models for building thermal mass of intermittently heated rooms for balancing energy consumption and indoor thermal comfort, *Energy and Buildings*, 317 (2024) 114376.
- [14] T. Razieli, Koppen-Geiger climate classification of Iran and investigation of its changes during 20th century, (2017). (in Persian)
- [15] V. Rezaee, M. Masoumnezhad, A. Tahvili, Feasibility of natural ventilation potential of residential buildings for different climates of Iran, (2024). (in Persian)
- [16] H. Heywood, 101 rules of thumb for low energy architecture, Riba publishing, 2019.
- [17] P. Mousighichi, Comparison of Courtyards in Traditional Iranian Houses in Different Climates of Iran, İzmir Ekonomi Üniversitesi, 2023.
- [18] A. Khalil, M. Mahgoub Bassuoni, M. Elsamadony, M. Raslan, Assessment of thermal comfort in operating rooms using PMV-PPD model, *Journal of Engineering Research*, 4(December) (2020) 51-62.
- [19] J. Sajedifar, R. Mirzaei, G.H. Teimori, A. Mehri, F. Azadbakht, A. Choupani, M.R. Taheri, Evaluation of thermal comfort in an Iranian educational hospital using PMV-PPD model, *Biotech Health Science*, 2017 (2017).
- [20] J. Zhou, G. Zhang, Y. Lin, Y. Li, Coupling of thermal mass and natural ventilation for thermal comfort and energy efficiency in a school building, *Energy and Buildings*, 320 (2024) 114547.
- [1] S. Herb, S. Wolk, C. Reinhart, Beyond the bioclimatic chart: An automated simulation-based method for the assessment of natural ventilation and passive design potential, *Building and Environment*, 269 (2025) 112362.
- [2] V. Rezaee, A. Taghizadeh, Evaluating the impact of environmental indicators on thermal comfort for different climates of Iran using the PMV model, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 57(1) (2025). (in Persian)
- [3] E. Rodrigues, N.A. Fereidani, M.S. Fernandes, A.R. Gaspar, Diminishing benefits of thermal mass in Iranian climate: Present and future scenarios, *Building and Environment*, 258 (2024) 111635.
- [4] M.A. Samini, A. Hashemi, A. Asgari, The impact of thermal mass on envelope heat loss in the caldarium of Yazd's traditional baths, *Results in Engineering*, 22 (2024) 102266.
- [5] A.G. Kheybari, M. Gutai, B. Mok, G. Cavana, Thermal comfort of standard and advanced glazed building envelopes, *Energy and Buildings*, 329 (2025) 115211.
- [6] T. Kuczyński, A. Staszczuk, M. Gortych, R. Stryjski, Effect of thermal mass, night ventilation and window shading on summer thermal comfort of buildings in a temperate climate, *Building and Environment*, 204 (2021) 108126.
- [7] T. Kuczyński, A. Staszczuk, Experimental study of the influence of thermal mass on thermal comfort and cooling energy demand in residential buildings, *Energy*, 195 (2020) 116984.
- [8] C. Kandilli, M. Gür, H. Yilmaz, H.F. Öztop, Experimental and numerical analyses of a model Trombe wall employing the natural zeolite/perlite composite plate as a thermal mass for nearly zero energy buildings, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 160 (2025) 108386.
- [9] M. Li, X. Shen, W. Wu, K. Cetin, F. McIntyre, L. Wang, L. Ding, D. Bishop, L. Bellamy, M. Liu, Cooling demand reduction with nighttime natural ventilation to cool internal thermal mass under harmonic design-day weather conditions, *Applied Energy*, 379 (2025) 124947.

- ventilation strategies in Javanese vernacular houses for sustainable design, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, (2025) 1-20.
- [24] A. Reilly, O. Kinnane, The impact of thermal mass on building energy consumption, *Applied Energy*, 198 (2017) 108-121.
- [25] A.H. Mortazavi, S. Heidari, N. Nikghadam, An Evaluation of The Thermal Comfort of Users in Hot and Humid Climates (Case study: Indigenous housing in Kish Island), (2021). (in Persian).
- mass and natural ventilation in buildings, *Energy and Buildings*, 40(6) (2008) 979-986.
- [21] J. Toroxel, S. Silva, A Review of Passive Solar Heating and Cooling Technologies Based on Bioclimatic and Vernacular Architecture. *Energies*, 17 (5), 1006, in, 2024.
- [22] T. Kuczyński, A. Staszczuk, Experimental study of the thermal behavior of PCM and heavy building envelope structures during summer in a temperate climate, *Energy*, 279 (2023) 128033.
- [23] M. Muqoffa, Suyitno, I. Yaningsih, R.A. Rachmanto, K. Himawan, N. Caroko, Basuki, Exploring natural

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

V. Rezaee, M. Masoumnezhad, *Study of the Effect of Thermal Mass Variations on Thermal Comfort of Buildings in Iran's Climates Using the Köppen–Geiger method*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 57(8) (2025) 989-1012.

DOI: [10.22060/mej.2025.24994.7912](https://doi.org/10.22060/mej.2025.24994.7912)



