

Investigating the Impact of Iwan Design Features on the Thermal Behavior of Traditional Buildings in Tehran

Ahmad Reza Keshtkar Galati¹, Shahrzad Badakhshan²

Received: 2025-10-27, Accepted: 2026-06-27

DOI: 10.22034/rau.2026.2075971.1274

Extended Abstract

The optimization of architectural elements in response to local climatic conditions has long been a crucial factor in achieving thermal comfort and energy efficiency within buildings. In traditional Iranian architecture, passive strategies such as central courtyards and semi-open spaces like the *Iwan* have played an integral role in moderating microclimatic conditions, reducing dependence on mechanical systems, and ensuring thermal equilibrium throughout seasonal changes. This research investigates the thermal and energy performance of the *Iwan* as a passive architectural element in hot and dry climates, focusing on the Moghadam Museum House in Tehran as a representative example of historical architecture adapted to local environmental conditions. The study aims to analyze how the presence, orientation, and geometric configuration of the *Iwan* influence indoor thermal comfort, natural ventilation, and overall building energy consumption. For this purpose, a three-dimensional model of one of the rooms in the Moghadam Museum House was developed and simulated using DesignBuilder software, which is powered by the EnergyPlus dynamic thermal simulation engine. Two primary scenarios were tested: the baseline model without an *Iwan* and an alternative model with the existing northern *Iwan* as depicted in the historical plan of the building. Additional simulations were performed by rotating the *Iwan* to the southern, eastern, and western orientations to determine the optimal configuration for thermal and energy performance under Tehran's climatic conditions. The simulations were conducted under natural ventilation without any mechanical HVAC systems to isolate the passive effects of the *Iwan*. All boundary walls except the façade containing the *Iwan* were treated as adiabatic surfaces, ensuring consistent heat transfer conditions for accurate comparison. The study focused on analyzing annual and monthly variations in air temperature, mean radiant temperature (MRT), operative

1. Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Kharazmi University, Tehran, Iran (Corresponding author).
Email: A.keshtkar@khu.ac.ir

 0000-0001-6916-380X

2. Graduated with a master's degree in Architecture and Energy, Rassam Institute of Higher Education, Karaj, Iran.
Email: sh_badrkhahan@yahoo.com

 0009-0004-1643-5858



temperature, relative humidity, Predicted Mean Vote (PMV), and Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), all evaluated according to ASHRAE Standard 55 for thermal comfort.

The results of the annual simulation revealed significant differences in indoor environmental conditions across various orientations of the Iwan. In the absence of an Iwan, the average indoor air temperature reached 23.50°C, with a mean radiant temperature of 24.18°C and an operative temperature of 23.84°C, whereas the inclusion of a northern Iwan reduced these values to 22.88°C, 23.49°C, and 23.19°C, respectively. The southern Iwan demonstrated slightly higher thermal gains, with an operative temperature of 25.91°C, but provided more effective solar shading during peak summer months. The eastern and western Iwans resulted in higher indoor temperatures (above 25.5°C), indicating increased exposure to low-angle solar radiation during the morning and afternoon. Relative humidity also varied across configurations, averaging 27.12% in the base case and 22.91% with a southern Iwan, reflecting the interaction between ventilation rates and indoor air dryness. The Fanger comfort indices indicated that the northern and southern Iwans provided the most balanced thermal comfort conditions. The annual average PPD values were 76.16% for the northern Iwan and 68.52% for the southern one, while the PMV indices were -0.58 and +0.17, respectively, indicating that the southern Iwan produced slightly warmer conditions but still acceptable comfort levels.

Further analysis revealed that the presence of an Iwan contributed to the mitigation of temperature fluctuations throughout the day, leading to improved thermal stability and lower cooling demand. The absence of an Iwan resulted in increased solar radiation penetration, especially during summer, causing overheating and higher PPD values exceeding 90% in July and August. The inclusion of a southern Iwan reduced the cooling load by approximately 10% compared to the base case, highlighting its shading effectiveness against high-angle solar radiation. The total annual cooling energy demand in the no-Iwan model was 36,850.09 kWh, while the Iwan model consumed 33,259.98 kWh, demonstrating a substantial reduction in energy consumption due to passive architectural adaptation. Heating demand, conversely, slightly increased in the Iwan case (211.96 kWh compared to 61.43 kWh) as a result of shading effects reducing solar heat gain during winter. Despite this, the net annual energy performance favored the Iwan-equipped configuration due to its improved summer efficiency. Moreover, airflow analysis indicated that natural ventilation rates (ACH) were highest for the open southern Iwan configuration, reaching 1.31 ACH, while the no-Iwan scenario had a lower rate of 0.87 ACH. Enhanced cross-ventilation contributed to efficient removal of internal heat and improved air quality, reducing reliance on mechanical fans and active cooling systems. Simulation outputs for PMV and PPD further confirmed these results: the southern Iwan maintained PMV within the ± 0.5 comfort range during 63% of annual hours, while the northern Iwan achieved acceptable comfort during 59% of the time. These findings align closely with previous research emphasizing the critical role of semi-open architectural spaces in moderating heat exchange and enhancing

occupant comfort in arid regions (Zhou et al., 2023; Heidari & Sharples, 2022).

In addition to thermal comfort, the study examined the effect of the Iwan on lighting and energy efficiency. The Iwan acted as a passive shading device, mitigating glare and distributing daylight more uniformly across interior spaces. This effect reduced direct solar penetration, preventing localized overheating near windows and reduced cooling loads. Although artificial lighting consumption was slightly higher in Iwan-equipped scenarios due to reduced direct sunlight, the overall energy savings from reduced cooling demands outweighed this increase. The total electricity use for mechanical systems, including fans and pumps, was 7,314.65 kWh in the Iwan scenario, compared to 7,790.69 kWh in the scenario without the Iwan, representing an approximately 6% reduction in auxiliary energy use.

From a seasonal perspective, the southern Iwan demonstrated superior performance in the warm months (May to September), mitigating overheating and stabilizing indoor temperatures around 26°C. The northern Iwan and the no-Iwan configurations performed similarly during cooler months (November to February), indicating that the northern shading had limited but positive effects during winter. The eastern and western Iwans, although contributing to shading, introduced higher thermal loads due to direct morning and evening sun exposure, suggesting that they are less effective in Tehran's climatic context.

Overall, the findings confirm that the incorporation of a southern Iwan provides optimal thermal and energy performance in hot and dry climates. The results emphasize that passive architectural elements, when designed based on climatic data, can substantially enhance the environmental performance of buildings. The presence of the Iwan effectively balances solar gain, ventilation, and daylight distribution, thereby enhancing thermal comfort and minimizing reliance on mechanical systems. This corroborates traditional Persian architectural principles, in which spatial hierarchies and semi-open courtyards were historically employed to regulate microclimates naturally.

In conclusion, the simulation-based assessment demonstrates that integrating Iwans into modern residential architecture in hot and dry regions can play a significant role in achieving sustainable building performance. The study highlights the potential for combining traditional passive strategies with modern simulation tools—such as DesignBuilder—to optimize design decisions. Implementing such elements can lead to measurable reductions in cooling energy demand, enhanced thermal comfort, and improved indoor environmental quality, thereby fostering more resilient and energy-efficient buildings. The Moghadam Museum House case study exemplifies how architectural heritage can inform contemporary sustainable design practices, bridging the gap between traditional wisdom and modern technology. These results underscore the importance of climate-responsive architectural design, particularly the reintroduction of Iwans and courtyards as integral components of building envelopes in regions characterized by high solar radiation and low humidity. The study suggests that future research should expand upon these findings by incorporating occupant



behavior modeling, multi-objective optimization of geometric parameters, and hybrid systems integrating photovoltaic shading devices to further enhance building performance and energy resilience in arid environments.

Keywords: Iwan; Hot and dry climate; House; Thermal comfort; Energy simulation

بررسی تأثیر ویژگی‌های عنصر ایوان در رفتار حرارتی ساختمان‌های سنتی شهر تهران

احمد رضا کشت کار قلاتی^۱، شهرزاد بدرخواهان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴-۰۸-۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵-۰۴-۰۶

DOI: 10.22034/rau.2026.2075971.1274

چکیده

طراحی فضاهای نیمه‌باز مانند ایوان و حیاط مرکزی در اقلیم‌های گرم و خشک، از مهم‌ترین راهکارهای غیرفعال در کنترل تابش، تهویه طبیعی و بهبود آسایش حرارتی ساختمان‌ها محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی نقش ایوان در بهینه‌سازی عملکرد حرارتی و کاهش مصرف انرژی در اقلیم گرم و خشک تهران انجام شد. برای این منظور، یک مدل برگرفته از اتاق مجاور ایوان در خانه‌های سنتی به عنوان نمونه انتخاب گردید و مدل‌سازی سه‌بعدی آن در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر بر پایه موتور شبیه‌سازی انرژی پلاس صورت گرفت. در این مطالعه، دو سناریوی «با ایوان» و «بدون ایوان» و همچنین چهار موقعیت جغرافیایی ایوان (شمالی، جنوبی، شرقی و غربی) مورد تحلیل قرار گرفتند. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی شامل دمای هوا، دمای تابشی میانگین، شاخص آسایش حرارتی PMV و شاخص ناراضی‌ت حرارتی PPD در بازه زمانی یک‌ساله ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که ایوان جنوبی در فصول گرم موجب کاهش میانگین دمای داخلی تا ۰/۶ درجه سانتی‌گراد و کاهش PPD تا حدود ۸ درصد نسبت به حالت بدون ایوان گردید. همچنین، وجود ایوان باعث کاهش بار سرمایشی سالیانه و بهبود کارایی تهویه طبیعی شد. در مقابل، حذف ایوان یا استقرار آن در جهات شرقی و غربی سبب افزایش دمای داخلی و مصرف انرژی گردید. همچنین باید توجه داشت که تأثیرات دمای صبحگاهی در ایوان شرقی در برخی مواقع سال باعث کاهش میزان گرمایش مورد نیاز ساختمان خواهد شد. یافته‌ها بیانگر آن است که طراحی بهینه ایوان می‌تواند ضمن افزایش پایداری حرارتی، موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی و ارتقای کیفیت محیطی در ساختمان‌های مسکونی اقلیم گرم و خشک گردد.

کلیدواژه‌ها: ایوان، ابنیه سنتی، اقلیم گرم خشک، شبیه‌سازی انرژی

۱. استادیار گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول).

Email: A.keshtkar@khu.ac.ir

ORCID: 0000-0001-6916-380X

۲. کارشناسی ارشد، گروه معماری و انرژی، مؤسسه آموزش عالی رسام، کرج، ایران.

Email: sh_badrkhahan@yahoo.com

ORCID: 0009-0004-1643-5858



۱. مقدمه

طراحی اقلیمی و استفاده از عناصر بومی مانند حیاط مرکزی و ایوان، نقش مؤثری در ارتقای آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی دارند. حیاط مرکزی با ایجاد یک میکرواقلیم، از طریق کنترل تابش، تقویت تهویه طبیعی و کاهش نوسانات دما، عملکرد حرارتی و نوری بنا را بهبود می‌بخشد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد هندسه حیاط، جهت‌گیری و عناصر غیرفعال نظیر سایه و پوشش گیاهی تأثیر مستقیمی بر این عملکرد دارند (Soflaei et al., 2016; Zamani et al., 2018; Taleghani et al., 2014).

پژوهش‌های داخلی نیز نقش مؤثر حیاط مرکزی و ایوان را در بهبود آسایش حرارتی و تهویه طبیعی در اقلیم‌های مختلف ایران تأیید کرده‌اند. مطالعات موردی نشان می‌دهد که طراحی مناسب فرم و تناسبات این عناصر، موجب کاهش نارضایتی حرارتی و افزایش پایداری دمایی فضاهای داخلی می‌شود (حسینی لیچایی و همکاران، ۱۴۰۱؛ تقی‌پور و همکاران، ۱۴۰۲؛ کریم‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱). همچنین تحلیل‌های مبتنی بر CFD بیانگر آن است که جهت‌گیری ایوان، میزان بازبودگی و ارتباط آن با حیاط بر نرخ تعویض هوا و عملکرد حرارتی ساختمان تأثیر معناداری دارد (راهایی، ۱۴۰۰؛ قهرمان‌ایزدی و همکاران، ۱۴۰۲).

مطالعات پارامتریک نشان می‌دهند که عملکرد حرارتی حیاط و ایوان به‌شدت وابسته به اقلیم و هندسه آنهاست؛ به‌گونه‌ای که طراحی مناسب می‌تواند بار سرمایشی و گرمایشی را کاهش دهد، در حالی که طراحی نامناسب باعث افزایش جذب حرارت و افت آسایش می‌شود. از این رو، انتخاب فرم و میزان بازبودگی این فضاها باید بر پایه تحلیل اقلیمی و شبیه‌سازی دقیق انجام گیرد (Taleghani et al., 2014b; Sun et al., 2023). پژوهش‌های اخیر بر ضرورت بازخوانی هوشمندانه این عناصر سنتی در معماری معاصر با رویکرد انرژی‌محور تأکید دارند (آزادی‌فر و همکاران، ۱۴۰۰؛ دهقان و همکاران، ۱۴۰۱).

پیشرفت موتورهای شبیه‌سازی انرژی نظیر انرژی پلاس^۱ و ابزارهای واسط مانند دیزاین بیلدر^۲ امکان ارزیابی دینامیک رفتار حرارتی، تهویه طبیعی و شاخص‌های آسایش^۳ یا مدل‌های تطبیقی در سناریوهای مختلف طراحی فراهم ساخته است (Al-dawoud, 2008; Crawley et al., 2001). بهره‌گیری از این ابزارها در تحقیقات اخیر نشان داده است که سناریوهای حیاط باز، نیمه‌باز و بسته می‌توانند تفاوت‌های چشم‌گیری در دمای عملیاتی، نرخ تهویه و مصرف انرژی ایجاد کنند (Soflaei et al., 2022).

(al., 2020; Tabadkani et al., 2022).

این پژوهش با هدف تعیین نقش ایوان در بهینه‌سازی عملکرد حرارتی و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های سنتی اقلیم گرم و خشک تهران انجام شد. اهداف پژوهش عبارتند از: – ارزیابی تأثیر جهت‌گیری و بازبودگی ایوان بر دمای داخلی و شاخص‌های آسایش حرارتی،

– مقایسه عملکرد حرارتی ساختمان در سناریوهای «با ایوان» و «بدون ایوان» و تعیین جهت بهینه از منظر آسایش حرارتی، تهویه طبیعی و مصرف انرژی.

همچنین، پژوهش به دنبال پاسخ به این سؤالات است:

– جهت‌گیری و بازبودگی ایوان چگونه می‌تواند دمای داخلی و شاخص‌های آسایش حرارتی را بهبود بخشد؟

– جهات مختلف ایوان چه تأثیری بر پایداری حرارتی و مصرف انرژی ساختمان می‌گذارد؟

بر این اساس، مقاله حاضر با تکیه بر شبیه‌سازی انرژی و آسایش حرارتی، به بررسی نقش بازبودگی حیاط و جایگاه ایوان در عملکرد حرارتی و نوری یک نمونه مسکونی در اقلیم گرم و خشک تهران می‌پردازد و می‌کوشد سناریوی بهینه را از منظر آسایش حرارتی، تهویه طبیعی و مصرف انرژی ارائه دهد؛ نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان راهنمایی کاربردی در طراحی یا باززنده‌سازی مسکن اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد.

۲. ادبیات تحقیق

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که فضاهای باز و نیمه‌باز (از جمله ایوان) در معماری مناطق گرم و خشک، علاوه بر کارکرد فرهنگی، نقش تعیین‌کننده در تنظیم شرایط حرارتی و نوری ساختمان‌ها داشته و می‌تواند به عنوان راه‌حل غیرفعال کاهش مصرف انرژی و افزایش آسایش حرارتی مطرح شود (Safarzadeh & Bahadori, 2005; Meir et al., 1995). پارامترهای هندسی (نسبت‌های ابعادی، عمق، جهت‌گیری)، عناصر نیمه‌باز/ایوان، و انتخاب مصالح و جرم حرارتی، در کارایی حرارتی و توزیع نور تأثیرگذارند (Muhaisen & Gadi, 2006; Ghaffarianhoseini et al., 2015).

– **تعدیل میکرواقلیم:** مطالعات نشان می‌دهند فضاهای باز باعث کاهش دمای درون‌ساختمان در روزهای گرم، افزایش نرخ تهویه طبیعی و بهبود توزیع نور روز می‌شوند (Meir et al., 2011; Sadafi et al., 1995). ایوان‌ها به عنوان سایه‌اندازهای بزرگ و فضاهای واسط، در کاهش تابش مستقیم و کنترل

جرم حرارتی، عایق‌سازی مناسب، کنترل بازشو، استفاده هدفمند از آب و گیاه) می‌توانند نقش قابل‌توجهی در کاهش مصرف انرژی و ارتقای آسایش ایفا کنند. بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های چندمعیاره و اعتبارسنجی میدانی برای تعیین پارامترهای بهینه توصیه می‌شود (Taleghani et al., 2014b; Ochoa et al., 2012).

مروری بر پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که طراحی مناسب ایوان می‌تواند آسایش حرارتی و روشنایی را به‌طور هم‌زمان بهبود دهد و مصرف انرژی کلی ساختمان را کاهش دهد. لذا مطالعات موردی و شبیه‌سازی‌های ویژه هر سایت برای تعیین «جهت بهینه و پارامترهای هندسی» ضروری است.

۳. روش تحقیق

۳.۱. ابزارها و روش‌ها

این پژوهش از نوع کاربردی و مبتنی بر شبیه‌سازی انرژی است. روش پژوهش شامل سه مرحله اصلی است: ۱. جمع‌آوری داده‌های ورودی، ۲. مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی رفتار حرارتی و نوری و ۳. تحلیل نتایج و اعتبارسنجی (Zuhaib et al., 2019; Zhou et al., 2023; Fouquier et al., 2013).

۳.۲. مورد مطالعه و بستر طراحی

نمونه موردی پژوهش، واحدی از یک اتاق/فضای مسکونی در تهران است. مختصات جغرافیایی و داده‌های اقلیمی از فایل‌های هواشناسی و خروجی نرم‌افزار کلایمت^۶ به عنوان ورودی شبیه‌سازی استفاده شدند (Fumo, 2014). مدل‌سازی سه‌بعدی در دیزاین بیلدر انجام شد؛ هندسه پایه از پلان و مقاطع واقعی خانه مقدم اقتباس و یکی از اتاق‌های شاخص به عنوان مدارک مدل‌سازی انتخاب گردید (شکل ۱).

۳.۳. شاخص‌ها و متغیرهای مورد اندازه‌گیری

ارزیابی آسایش حرارتی بر اساس دو شاخص شاخص PMV^۸ و PPD^۹ انجام می‌شود. PMV شرایط حرارتی پایدار و حس گرمایی افراد را در بازه ۳- تا ۳+ نشان می‌دهد و PPD درصد نارضایتی کاربران را پیش‌بینی می‌کند. بر اساس استاندارد اشری، این دو شاخص معیار اصلی سنجش آسایش حرارتی در فضاهای مختلف به‌شمار می‌آیند.

«جدول ۱» دامنه مقادیر شاخص PMV را بر اساس استاندارد ASHRAE 55-2017 نمایش می‌دهد. این شاخص، احساس

دمای تشعشی سطوح نقش دارند (Shaeri et al., 2018; Es- (kandari et al., 2018).

– **شواهد تجربی و شبیه‌سازی**^۴: ترکیب اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی‌های عددی^۵ رویکردی مرسوم برای ارزیابی تأثیر حیات و ایوان است؛ مطالعات متنوعی این رویه را تأیید کرده‌اند و نشان داده‌اند که اعتبارسنجی میدانی ضروری است (Crawley et al., 2001; Zhang et al., 2017; Ghaffarianhoseini et al., 2015).

– **شاخص‌های آسایش**^۶: بیشتر مطالعات آسایش را با مدل PMV/PPD یا شاخص‌های بیرونی مانند PET یا UTCI ارزیابی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد حیات باز و ایوان مناسب می‌تواند PMV را به محدوده نزدیک صفر حرکت دهند و PPD را کاهش دهند (Shaeri et al., 2018; Eskandari et al., 2018).

– **هندسه و نسبت‌های ابعادی**: نسب‌های ابعادی، به‌طور مستقیم روی میزان تابش خورشیدی ورودی، سایه‌زایی و جریان هوا اثر می‌گذارند (Muhaisen & Gadi, 2006; Muhaisen, 2006; Yasa & Ok, 2014).

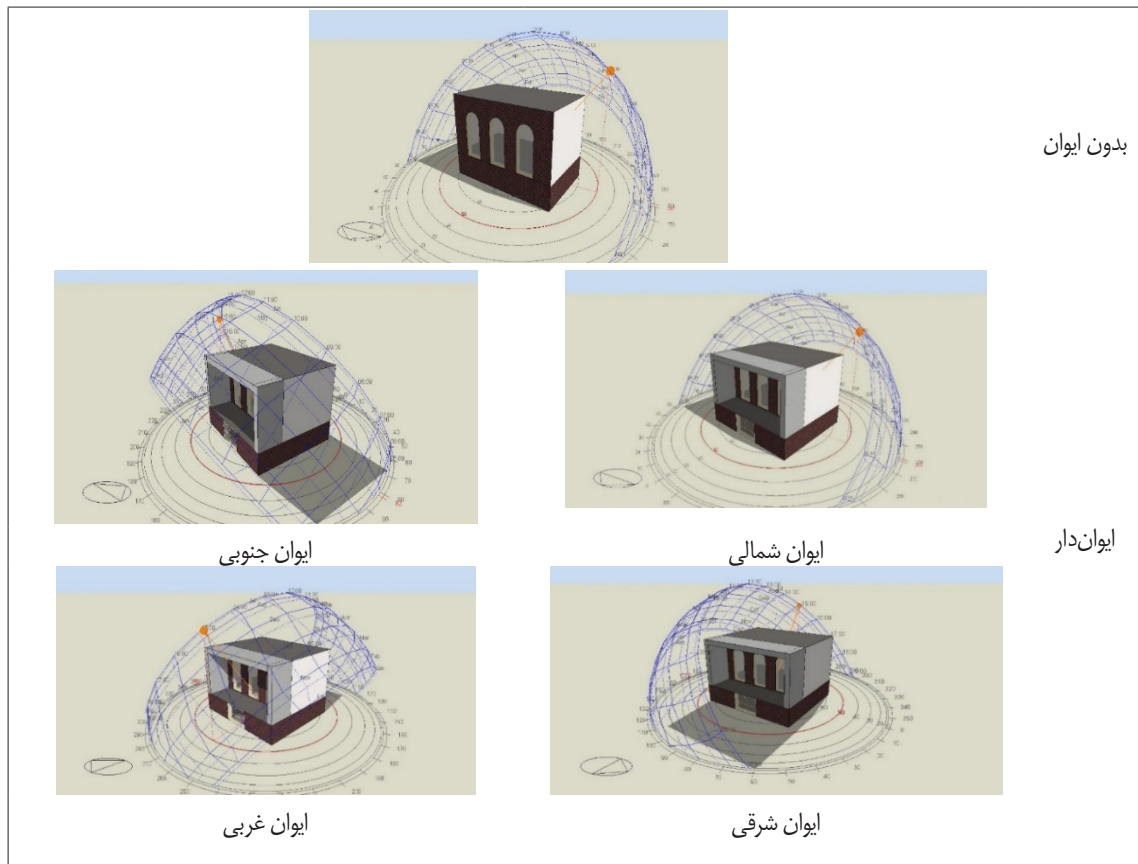
– **جهت‌گیری**: در اقلیم‌های گرم خشک جهت‌گیری طوری تنظیم می‌شود که تابش بعدازظهر شدید (جنوب‌غربی/غرب) کنترل شود و دریافت نور زمستانی محفوظ بماند؛ این مسئله برای کاهش تقاضای سرمایش تابستانی و تأمین گرمایش خورشیدی زمستانی حیاتی است (Taleghani et al., 2014a; Shashua-Bar & Hoffman, 2003).

– **رفتار حرارتی ایوان و مقایسه با فضاهای بسته**: مطالعات نشان داده‌اند که ایوان به‌ویژه در جبهه‌های جنوبی-جنوبی‌غربی می‌تواند دمای عملیاتی فضا و دمای تشعشی را کاهش دهد و شاخص PMV/PPD را بهبود بخشد؛ درمجموع ایوان در کاهش نیاز سرمایش در ماه‌های گرم مؤثر است (Shaeri et al., 2018; Eskandari et al., 2018).

– **تهویه طبیعی و جریان هوا**: فضاهای باز جریان طبیعی هوا و نرخ تهویه داخلی را افزایش می‌دهد (ACH بالاتر)؛ در مقابل فضاهای بسته یا نیمه‌بسته اغلب تهویه را محدود می‌کنند (Sadafi et al., 2011; Ochoa et al., 2012).

– **روشنایی روز و خیرگی**: فضاهای باز و نیمه باز توزیع نور روز را بهبود بخشیده و امکان کاهش مصرف روشنایی مصنوعی را فراهم می‌آورند (Ochoa et al., 2012; Hao et al., 2019).

پژوهش‌ها نشان می‌دهد که عناصر سنتی مثل ایوان و حیات مرکزی، در صورت بومی‌سازی و سازگاری با الزامات امروزی (حفظ



شکل ۱. سناریوهای پژوهش و نمایش مسیر حرکت خورشید و سایه‌ها.

جدول ۱. دامنه مقادیر شاخص PMV و توصیف احساس حرارتی (ASHRAE, 2017).

احساس حرارتی	بسیار گرم	گرم	گرم تا حدی	متعادل	تا حدی سرد	سرد	بسیار سرد
مقدار	+۳	+۲	+۱	۰	-۱	-۲	-۳

حرارتی میانگین افراد را در یک فضا بیان می‌کند و مقدار آن از +۳ (بسیار گرم) تا -۳ (بسیار سرد) متغیر است. محدوده مطلوب آسایش حرارتی در بازه ۰,۵- تا ۰,۵+ قرار دارد که در آن درصد نارضایتی پیش‌بینی‌شده (PPD) کمتر از ۱۰ درصد است. رابطه شاخص PMV بر اساس مدل فنگر به صورت زیر است:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)[(M - W) - H - E_c - C_{rec} - E_{rec}] \quad (۱)$$

$$E = 3.05 \times 10^{-3} (256 t_{sk} - 3373 - P_a) + E_{sw} \quad (۲)$$

$$E_c = 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99(M - W) - P_a] + 0.42(M - W - 58.15) \quad (۳)$$

$$C_{rec} = 0.0014 M (34 - T_a) \quad (۴)$$

$$E_{rec} = 1.72 \times 10^{-5} M (5867 - P_a) \quad (۵)$$

$$H = K_{cl} = \frac{t_{sk} - t_{cl}}{I_{cl}} \quad (۶)$$

حالت‌های مختلف (بدون ایوان، ایوان شمالی، ایوان جنوبی، ایوان شرقی و ایوان غربی) است.

۳.۱. تحلیل سالانه مؤلفه‌های آسایش

به منظور ارزیابی کلی‌تر، میانگین سالانه شاخص‌های حرارتی و آسایشی در هر سناریو محاسبه شده است (جدول ۳).

جدول ۳. میانگین سالانه مؤلفه‌های آسایش در سناریوهای مختلف ایوان.

ایوان غربی	ایوان شرقی	ایوان جنوبی	ایوان شمالی	بدون ایوان	
۲۵,۵۳	۲۵,۴۱	۲۵,۵۸	۲۲,۸۸	۲۳,۵۰	دمای هوا (C°)
۲۶,۲۲	۲۶,۰۶	۲۶,۲۴	۲۳,۴۹	۲۴,۱۸	دمای تشعشعی (C°)
۲۵,۵۸	۲۵,۷۴	۲۵,۹۱	۲۳,۱۹	۲۳,۸۴	دمای عملیاتی (C°)
۱۷,۲۷	۱۷,۲۷	۱۷,۲۷	۱۷,۲۷	۱۷,۲۷	دمای خشک محیط بیرونی (C°)
۲۴,۱۹	۲۴,۵۶	۲۲,۹۱	۲۷,۸۹	۲۷,۱۲	رطوبت نسبی (%)
۷۴,۶۳	۷۵,۰۴	۶۸,۵۲	۷۶,۱۶	۷۶,۶۶	شاخص نارضایتی فانگر (%)
+۰,۳۴	+۰,۳۲	+۰,۱۷	-۰,۵۸	-۰,۳۴	شاخص میانگین احساس حرارتی فانگر (%)

مطابق «جدول ۳»، دمای هوای داخلی در حالت ایوان جنوبی نسبت به سایر جهت‌ها بالاتر و شاخص PMV بیشتر است که نشان‌دهنده گرمای بیشتر و نزدیک‌تر شدن به محدوده آسایش در زمستان است. رطوبت نسبی در ایوان جنوبی پایین‌تر و در ایوان شمالی بالاتر ثبت شده است. شاخص نارضایتی (PPD) در ایوان جنوبی به کمترین مقدار (۶۸,۵۲٪) رسیده که نسبت به حالت بدون ایوان (۷۶,۶۶٪) بهبود قابل توجهی دارد. در مجموع، داده‌ها بیانگر آن است که وجود ایوان به‌ویژه در جبهه جنوبی سبب پایداری حرارتی بیشتر و کاهش نوسانات دمایی می‌شود.

۳.۲. نتایج ماهانه رفتار حرارتی

نتایج شبیه‌سازی سالیانه برای حالت‌های مختلف ایوان در «جدول ۴» نمایش داده شده است. داده‌ها نشان‌دهنده نوسان دمای داخلی در ماه‌های سرد و گرم سال و نیز تأثیر موقعیت ایوان بر تعدیل دمای داخلی و شاخص‌های آسایش است.

که در آن:

M: متابولیسم بدن (W/m^2)

W: کار مکانیکی (W/m^2)

t_{sk} : دمای پوست (C°)

t_{cl} : دمای سطح لباس (C°)

t_a : دمای هوا (C°)

P_a : فشار جزئی بخار آب (Pa)

α_{cl} : مقاومت حرارتی لباس ($m^2 \cdot K/W$)

K_{cl} : ضریب انتقال حرارت لباس

E_{sw} : تبخیر ناشی از تعریق (W/m^2)

برای محاسبه شاخص PPD از رابطه شماره (۷) استفاده می‌شود. شاخص PPD با توجه به آسایش حرارتی در محیط شکل می‌گیرد، و میزان پیش‌بینی درصد نارضایتی افراد از محیط (احساس نارضایتی از آسایش حرارتی در محیط)، را بیان می‌کند. این شاخص نیز از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$PPD = 100 - 95 e^{(-0.03353 \times PMV^4 - 0.2179 \times PMV^2)} \quad (7)$$

شاخص PPD تخمینی از درصد افرادی است که در یک شرایط حرارتی خاص احساس ناراحتی می‌کنند، حتی اگر شرایط نزدیک به حالت خنثی باشد.

جدول ۲. دامنه مقادیر آسایش حرارتی (ASHRAE, 2017).

مقدار PMV	حداقل مقدار PPD
۰	حدود ۵٪
$\pm 0,5$	حدود ۱۰٪
± 1	حدود ۲۶٪

در تحلیل آسایش حرارتی، محدوده قابل قبول PMV و درصد نارضایتی PPD به عنوان شاخص‌های تعیین‌کننده ترجیح داده شدند (Nabil & Mardaljevic, 2006; Reinhart & Wienold, 2010).

۳. یافته‌ها

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انرژی و حرارتی ارائه می‌شود. هدف از این تحلیل، مقایسه عملکرد حرارتی در



جدول ۴. نتایج ماهانه مؤلفه‌های حرارتی در سناریوهای مختلف ایوان.

نوامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	اوت	ژوئیه	ژوئن	مه	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	
۵,۵۹	۱۱,۴۲	۱۷,۷۹	۲۵,۹۰	۳۰,۰۷	۲۹,۸۷	۲۸,۲۵	۲۱,۷۴	۱۶,۳۰	۱۰,۶۶	۴,۹۸	۳,۸۹	دمای خشک بیرون (C°)
۱۰,۵۲	۱۷,۱۱	۲۳,۴۵	۳۲,۲۱	۳۷,۰۶	۳۷,۵۱	۳۶,۲۲	۲۷,۹۵	۲۲,۶۳	۱۶,۹۲	۱۰,۶۸	۸,۹۰	دمای هوا (C°)
۱۱,۰۰	۱۷,۶۸	۲۴,۲۳	۳۲,۹۳	۳۷,۷۶	۳۸,۳۰	۳۷,۰۶	۲۸,۸۱	۲۳,۳۶	۱۷,۵۶	۱۱,۲۶	۹,۳۹	دمای تشعشعی (C°)
۱۰,۷۶	۱۷,۴۰	۲۳,۸۴	۳۲,۵۷	۳۷,۴۱	۳۷,۹۰	۳۶,۶۴	۲۸,۲۸	۲۲,۹۹	۱۷,۲۴	۱۰,۹۷	۹,۱۵	دمای عملیاتی (C°)
۴۴,۰۰	۳۳,۱۸	۲۵,۷۲	۱۷,۷۷	۱۶,۳۷	۱۶,۲۴	۱۳,۶۶	۲۲,۸۷	۲۴,۸۱	۳۱,۷۸	۳۷,۵۸	۴۱,۸۸	رطوبت نسبی (%)
۹۹,۴۶	۶۷,۹۶	۱۷,۵۴	۶۶,۲۹	۹۹,۵۷	۹۹,۴۱	۹۸,۸۰	۴۳,۴۵	۵۸,۱۰	۷۱,۶۲	۹۹,۴۳	۱۰۰,۰۰	شاخص نارضایتی (%)
-۳,۹۰	-۲,۱۰	-۰,۳۲	+۱,۹۹	+۳,۹۷	+۴,۱۸	+۳,۶۰	+۰,۳۳	-۱,۷۳	-۲,۱۶	-۳,۸۷	-۴,۳۵	میانگین احساس حرارتی (%)
۱۰,۳۷	۱۶,۹۴	۲۳,۱۳	۳۱,۷۶	۳۶,۱۴	۳۶,۱۶	۳۴,۸۴	۲۷,۰۳	۲۱,۹۴	۱۶,۴۲	۱۰,۳۷	۸,۷۳	دمای هوا (C°)
۱۰,۸۳	۱۷,۴۸	۲۳,۸۵	۳۲,۴۳	۳۶,۷۶	۳۶,۸۱	۳۵,۵۴	۲۷,۷۶	۲۲,۵۷	۱۷,۰۰	۱۰,۹۱	۹,۱۹	دمای تشعشعی (C°)
۱۰,۶۰	۱۷,۲۱	۲۳,۴۹	۳۲,۰۹	۳۶,۴۵	۳۶,۴۹	۳۵,۱۹	۲۷,۳۹	۲۲,۲۶	۱۶,۷۱	۱۰,۶۴	۸,۹۶	دمای عملیاتی (C°)
۴۴,۴۲	۳۳,۵۳	۲۶,۲۲	۱۸,۲۱	۱۷,۱۹	۱۷,۶۹	۱۴,۷۴	۲۴,۰۴	۲۵,۸۳	۳۲,۷۷	۳۸,۳۲	۴۲,۳۳	رطوبت نسبی (%)
۹۹,۵۶	۶۹,۵۵	۱۸,۲۶	۶۰,۹۲	۹۸,۸۳	۹۷,۵۶	۹۴,۵۹	۴۳,۲۸	۶۳,۲۸	۷۶,۱۰	۹۹,۶۶	۱۰۰,۰۰	شاخص نارضایتی (%)
-۳,۹۵	-۲,۱۵	-۰,۴۲	+۱,۸۰	+۳,۵۸	+۳,۶۰	+۳,۰۲	-۰,۰۵	-۲,۰۱	-۲,۳۰	-۳,۹۶	-۴,۴۰	میانگین احساس حرارتی (%)
۱۶,۴۴	۲۳,۹۴	۲۶,۵۲	۳۳,۴۸	۳۶,۵۸	۳۶,۰۳	۳۴,۵۵	۲۷,۲۵	۲۲,۷۲	۱۹,۰۵	۱۵,۴۳	۱۴,۴۰	دمای هوا (C°)
۱۷,۲۴	۲۴,۹۵	۲۷,۴۸	۳۴,۰۹	۳۷,۰۲	۳۶,۴۷	۳۵,۰۱	۲۷,۷۹	۲۳,۳۲	۱۹,۶۳	۱۶,۱۹	۱۵,۱۷	دمای تشعشعی (C°)
۱۶,۸۴	۲۴,۴۴	۲۷,۰۰	۳۳,۷۸	۳۶,۸۰	۳۶,۲۵	۳۴,۷۸	۲۷,۵۲	۲۲,۹۷	۱۹,۳۴	۱۵,۸۱	۱۴,۷۸	دمای عملیاتی (C°)
۳۰,۱۹	۲۲,۳۱	۲۱,۵۰	۱۶,۹۹	۱۷,۱۸	۱۷,۹۳	۱۵,۳۸	۲۳,۸۴	۲۴,۸۱	۲۷,۹۱	۲۷,۶۴	۲۹,۳۲	رطوبت نسبی (%)
۷۸,۲۱	۱۸,۶۳	۱۸,۱۲	۸۴,۱۸	۹۹,۵۷	۹۷,۹۳	۹۴,۰۵	۳۸,۲۱	۵۷,۹۲	۵۳,۹۳	۸۷,۸۰	۹۴,۹۷	شاخص نارضایتی (%)
-۲,۲۸	-۰,۱۸	-۰,۵۵	+۲,۴۸	+۳,۷۳	+۳,۵۲	+۲,۸۶	۰,۰۰	-۱,۷۴	-۱,۵۹	-۲,۵۸	-۲,۸۶	میانگین احساس حرارتی (%)
۱۱,۶۴	۱۸,۸۲	۲۵,۱۳	۳۵,۳۸	۴۰,۰۳	۳۹,۱۷	۳۸,۳۳	۲۹,۸۳	۲۴,۲۴	۱۹,۰۴	۱۲,۳۹	۱۰,۱۹	دمای هوا (C°)
۱۲,۰۰	۱۹,۳۱	۲۵,۹۲	۳۶,۱۸	۴۰,۷۸	۳۹,۸۹	۳۹,۱۲	۳۰,۶۹	۲۴,۹۵	۱۹,۶۵	۱۲,۸۸	۱۰,۵۷	دمای تشعشعی (C°)
۱۱,۸۲	۱۹,۰۶	۲۵,۵۳	۳۵,۷۸	۴۰,۴۱	۳۹,۵۳	۳۸,۷۳	۳۰,۲۶	۲۴,۶۰	۱۹,۳۵	۱۲,۶۴	۱۰,۳۸	دمای عملیاتی (C°)
۴۰,۸۷	۲۹,۹۹	۲۳,۴۳	۱۵,۳۲	۱۴,۲۸	۱۵,۱۵	۱۲,۵۵	۲۰,۶۷	۲۲,۶۶	۲۸,۰۲	۳۳,۶۱	۳۸,۴۳	رطوبت نسبی (%)
۹۸,۹۰	۵۵,۳۳	۱۶,۴۰	۹۱,۲۸	۱۰۰,۰۰	۹۹,۹۸	۹۹,۹۷	۴۲,۶۸	۴۶,۸۰	۵۳,۲۷	۹۷,۸۶	۹۹,۹۹	شاخص نارضایتی (%)
-۳,۶۲	-۱,۶۵	-۰,۱۴	+۳,۲۸	+۵,۲۰	+۴,۸۴	+۴,۴۵	+۱,۰۸	-۱,۱۲	-۱,۵۸	-۳,۴۳	-۴,۰۳	میانگین احساس حرارتی (%)
۱۲,۴۱	۱۹,۸۱	۲۵,۵۷	۳۵,۴۵	۳۹,۵۸	۳۸,۹۷	۳۸,۱۳	۲۹,۵۴	۲۳,۹۸	۱۸,۸۱	۱۲,۶۴	۱۰,۷۸	دمای هوا (C°)
۱۲,۸۵	۲۰,۴۵	۲۶,۴۶	۳۶,۲۸	۴۰,۳۲	۳۹,۶۹	۳۸,۹۳	۳۰,۴۱	۲۴,۶۹	۱۹,۴۲	۱۳,۱۶	۱۱,۲۳	دمای تشعشعی (C°)
۱۲,۶۳	۲۰,۱۳	۲۶,۰۲	۳۵,۸۶	۳۹,۹۵	۳۹,۳۳	۳۸,۵۳	۲۹,۹۷	۲۴,۳۳	۱۹,۱۱	۱۲,۹۰	۱۱,۰۰	دمای عملیاتی (C°)
۳۸,۹۰	۲۸,۳۱	۲۲,۸۲	۱۵,۲۴	۱۴,۶۲	۱۵,۳۱	۱۲,۷۲	۲۱,۰۸	۲۳,۰۶	۲۸,۴۷	۳۳,۰۶	۳۶,۹۷	رطوبت نسبی (%)
۹۷,۵۳	۴۷,۰۱	۱۶,۷۷	۹۲,۳۲	۱۰۰,۰۰	۹۹,۹۷	۹۹,۹۶	۴۱,۷۵	۴۹,۰۱	۵۵,۶۴	۹۷,۵۲	۹۹,۹۶	شاخص نارضایتی (%)
-۳,۴۱	-۱,۳۶	+۰,۲۸	+۳,۳۱	+۵,۰۱	+۴,۷۶	+۴,۳۷	+۰,۹۶	-۱,۲۲	-۱,۶۵	-۳,۴۶	-۳,۸۶	میانگین احساس حرارتی (%)

ایوان غربی

۳.۳. تفسیر و تحلیل نتایج

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که موقعیت ایوان تأثیر چشم‌گیری بر رفتار حرارتی فضا و سطح آسایش کاربران دارد:

۱. ایوان جنوبی بهترین عملکرد حرارتی را در میان سناریوها نشان داده است. در این حالت، شاخص PMV برابر با $+0.17$ و شاخص ناراضیاتی حرارتی (PPD) برابر با 68.52% بوده است. این وضعیت بیانگر نزدیکی بیشتر به محدوده آسایش حرارتی استاندارد اشری در مقایسه با سایر جهات است. دمای هوا و دمای عملیاتی نیز در محدوده مطلوب‌تری نسبت به حالت‌های شرقی و غربی قرار دارد.

۲. ایوان شمالی در فصول سردتر سال به بهبود عملکرد حرارتی کمک کرده است. میانگین دمای داخلی در این سناریو حدود 0.6 درجه سانتی‌گراد کمتر از حالت بدون ایوان بوده و شاخص PMV منفی‌تر (سردتر) است. این نشان‌دهنده تأثیر خنک‌کنندگی مناسب ایوان شمالی در تابستان و حفظ شرایط معتدل در زمستان است.

۳. ایوان‌های شرقی و غربی بیشترین نوسان حرارتی را در طول سال تجربه کرده‌اند. دمای داخلی در این دو حالت بالاتر از سایر سناریوها بوده و شاخص PMV به حدود $+0.32$ تا $+0.34$ رسیده است، که بیانگر افزایش گرمای ادراک شده است. این امر ناشی از تابش مستقیم خورشید در ساعات صبح و بعدازظهر است که باعث افزایش بار حرارتی می‌شود.

۴. در حالت بدون ایوان، شاخص ناراضیاتی حرارتی بیش از 76% و PMV برابر با -0.34 بوده است، که بیانگر ناپایداری شرایط حرارتی در طول سال است. نبود ایوان موجب افزایش انتقال حرارت مستقیم از پوسته خارجی و افزایش نوسان حرارتی فضا شده است.

به‌طور کلی، ایوان جنوبی با توجه به زاویه تابش خورشید و عملکرد سایه‌اندازی مناسب، بهترین تعادل را میان جذب حرارت در زمستان و کاهش تابش مستقیم در تابستان ایجاد می‌کند. در مقابل، ایوان‌های شرقی و غربی به دلیل مواجهه با تابش شدید در ساعات بحرانی روز، نیاز به طراحی دقیق‌تر در عمق سایه‌انداز و بازو دارند.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که:

– جهت‌گیری ایوان جنوبی در اقلیم گرم و خشک تهران، بهترین عملکرد حرارتی را دارد.

– استفاده از ایوان با عمق مناسب می‌تواند نوسانات دمای داخلی را تا چند درجه کاهش دهد و شاخص آسایش حرارتی را

به محدوده استاندارد نزدیک کند.

– این نتایج با مطالعات مشابه در زمینه نقش فضاهای نیمه‌باز در معماری اقلیمی ایران همخوانی دارد (احمدی، ۱۳۸۴؛ بشارت و کیانیان، ۱۴۰۰؛ Zhou et al., 2023).

۴.۳. تحلیل آسایش حرارتی در جهات مختلف ایوان

«شکل ۲» نتایج شاخص‌های آسایش حرارتی را نشان می‌دهد. داده‌ها بیانگر تغییرات PMV و PPD در طول سال هستند و تأثیر جهت‌گیری ایوان را بر شرایط حرارتی فضاهای داخلی نمایش می‌دهند.

نتایج شبیه‌سازی آسایش حرارتی نشان می‌دهد که در دو حالت «با ایوان» و «بدون ایوان»، مقادیر دمای داخلی، دمای میانگین تابشی و دمای مؤثر حاصل از ترکیب آنها در فصول پاییز و زمستان، متناسب با شرایط اقلیم گرم و خشک تهران بوده و در محدوده آسایش حرارتی قرار دارند. با این حال، در فصول بهار و تابستان، به دلیل شدت و زاویه بالای تابش خورشید، وجود ایوان در جهت جنوبی نقش مؤثری در کاهش دمای داخلی و بهبود شرایط آسایش ایفا می‌کند.

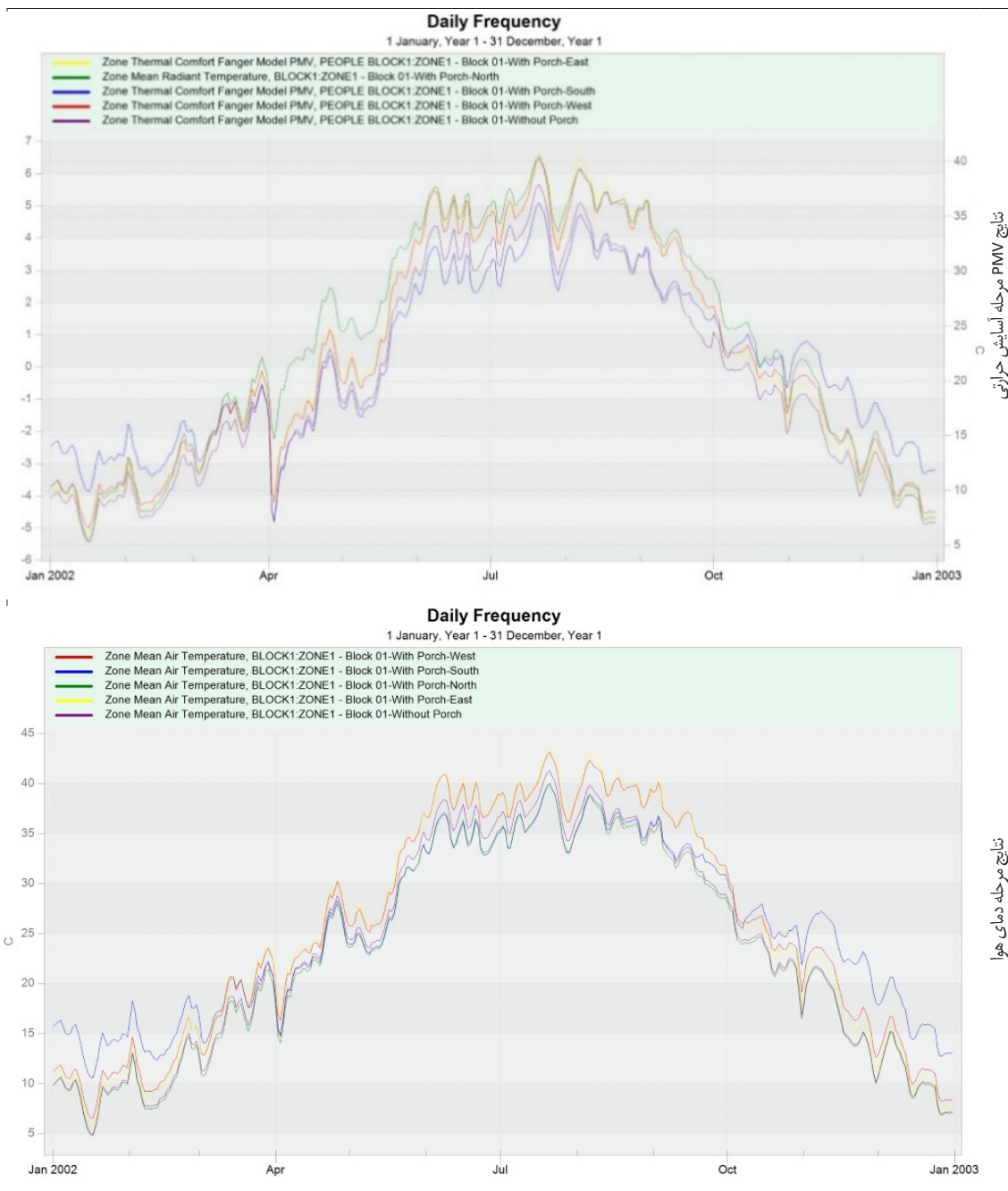
مقایسه عملکرد ایوان‌ها در جهات مختلف (شمالی، جنوبی، شرقی و غربی) نشان می‌دهد که ایوان جنوبی بالاترین بازده حرارتی را در فصول گرم سال دارد، در حالی که در فصول سرد، ایوان شمالی یا حتی حذف ایوان می‌تواند عملکردی مشابه و قابل قبول ارائه دهد.

به‌طور کلی، نتایج دمای داخلی سالانه نشان می‌دهد که حضور ایوان باعث پایداری حرارتی بیشتر فضاهای داخلی می‌شود. در پاییز و زمستان تفاوت چشم‌گیری میان ایوان شمالی و حالت بدون ایوان مشاهده نمی‌شود، اما در بهار و تابستان، ایوان جنوبی و شمالی هر دو موجب بهبود آسایش حرارتی می‌گردند.

۵.۳. مقایسه دمای سالانه و مصرف انرژی

«جدول ۵» نتایج کلی شبیه‌سازی را در دو حالت «با ایوان بهینه» و «بدون ایوان» نمایش می‌دهد. پارامترهای بررسی شده شامل مصرف انرژی الکتریکی، گرمایشی، سرمایشی، و شاخص‌های حرارتی داخلی هستند.

نتایج مقایسه داده‌های حاصل از شبیه‌سازی در دو حالت «با ایوان» و «بدون ایوان» نشان می‌دهد که میزان مصرف انرژی



شکل ۲. نمودار نتایج PMV مرحله آسایش حرارتی و مرحله دمای هوا در تمام جهات با ایوان و بدون ایوان.

جدول ۵. مقدار سالانه دما و مصرف انرژی.

پارامتر	بدون ایوان	ایوان بهینه
برق اتاق (کیلو وات ساعت)	۴۶۰۵,۳۲	۴۶۰۵,۳۲
روشنایی (کیلو وات ساعت)	۲۳۳۱,۲۰	۲۳۳۳,۳۳
فن‌های سیستم (کیلو وات ساعت)	۷۷۹۰,۶۹	۷۳۱۴,۶۵
پمپ‌های سیستم (کیلو وات ساعت)	۲۳۷,۵۶	۲۱۸,۰۰
انرژی پشتیبان (کیلو وات ساعت)	۰,۰۳	۰,۱۰
گرمایش (گاز) (کیلو وات ساعت)	۶۱,۴۳	۲۱۱,۹۶
سرمایش (برق) (کیلو وات ساعت)	۳۶۸۵,۰۹	۳۳۲۵۹,۹۸
دمای هوا (درجه سانتیگراد)	۲۶,۶۵	۲۶,۲۵
دمای تشعشعی (درجه سانتیگراد)	۲۸,۹۶	۲۸,۳۵
دمای عملیاتی (میانگین دمای تابشی و دمای هوا) (درجه سانتیگراد)	۲۷,۸۰	۲۷,۳۰
دمای خشک هوای بیرون (درجه سانتیگراد)	۱۷,۲۷	۱۷,۲۷
نفوذ هوای بیرونی (مگا وات ساعت)	-۱۹,۲۹	-۱۸,۵۳
روشنایی عمومی (مگا وات ساعت)	۲,۳۳	۲,۳۳
تجهیزات (مگا وات ساعت)	۴,۶۱	۴,۶۱
ساکتین (مگا وات ساعت)	۰,۸۵	۰,۸۵
کسب حرارت خورشیدی از بازوهای داخلی (مگا وات ساعت)	۰,۳۰	۰,۲۷
کسب حرارت خورشیدی از بازوهای بیرونی (مگا وات ساعت)	۱۴۴,۱۷	۱۳۲,۶۰
گرمایش محسوس ناحیه (مگا وات ساعت)	۴,۰۵	۴,۱۷
سرمایش محسوس ناحیه (مگا وات ساعت)	-۸۸,۰۴	-۷۹,۸۳
تهویه مکانیکی + تهویه طبیعی + نفوذ هوا	۰,۶۲	۰,۶۲

می‌یابد.

– دمای هوای داخلی، دمای تابشی میانگین و دمای عملیاتی در حالت بدون ایوان کمی بالاتر از حالت با ایوان است، در حالی که دمای خشک بیرونی در هر دو حالت یکسان باقی می‌ماند.

– نفوذ هوای خارجی^{۱۰} در حالت بدون ایوان بیشتر بوده و منجر به افزایش مصرف انرژی می‌شود.

– مصرف روشنایی عمومی، تجهیزات اداری و میزان اشغال^{۱۱} در هر دو حالت برابر است.

– پنجره‌های داخلی و خارجی در حالت با ایوان تغییرات دمایی کمتری نشان می‌دهند که بیانگر تأثیر مثبت ایوان در کنترل انتقال حرارت است.

– گرمایش محسوس ناحیه^{۱۲} در حالت با ایوان اندکی بیشتر و خنک‌کنندگی محسوس ناحیه^{۱۳} کمتر است.

– مجموع جریان هوای تهویه مکانیکی، تهویه طبیعی و نفوذی در هر دو حالت برابر بوده و تغییر محسوسی ندارد.

نتایج نشان می‌دهد که مصرف انرژی سرمایشی در حالت بدون ایوان حدود ۱۱٪ بیشتر از حالت دارای ایوان است، در حالی که مصرف گاز برای گرمایش در حالت با ایوان افزایش یافته است. این امر بیانگر نقش ایوان در کاهش بار سرمایشی در تابستان و در عین حال کاهش جذب حرارت خورشیدی در زمستان است. دمای هوای داخلی و دمای تابشی میانگین در حالت با ایوان حدود ۰,۴ تا ۰,۶ درجه سانتی‌گراد کمتر از حالت بدون ایوان ثبت شده‌اند که تأییدکننده تأثیر مثبت ایوان در تعدیل حرارتی فضاهای داخلی است. همچنین، کاهش مصرف انرژی فن‌ها در حالت دارای ایوان بیانگر بهبود تهویه طبیعی و کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی است.

به‌طور کلی، داده‌ها نشان می‌دهد که وجود ایوان موجب بهبود عملکرد حرارتی و پایداری دمایی ساختمان شده و با کاهش بار سرمایشی و خنک‌کنندگی، مصرف انرژی فن‌ها و سیستم‌های تهویه را بهینه می‌سازد.

۳.۶. تحلیل مصرف ماهانه انرژی الکتریکی و گاز طبیعی

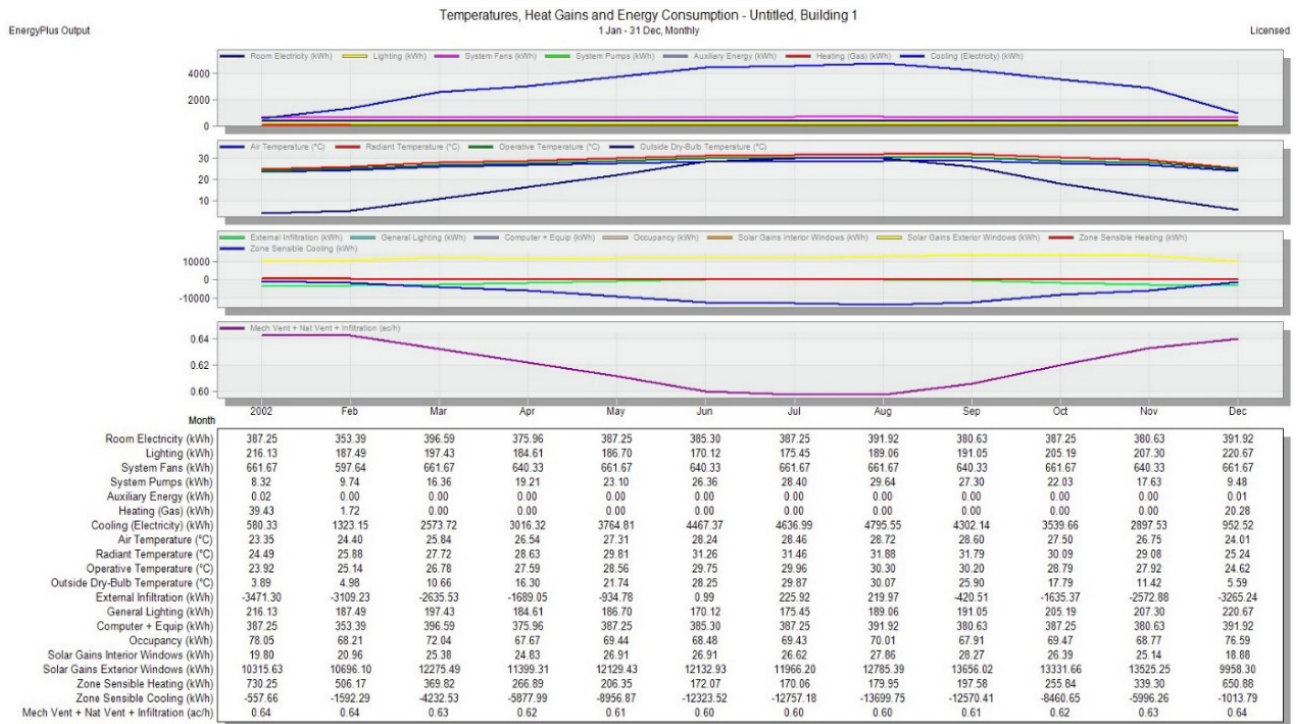
نمودارها (شکل‌های ۳ و ۴) تغییرات ماهانه مصرف انرژی الکتریکی و گاز طبیعی را در دو حالت «با ایوان» و «بدون ایوان» با هدف بررسی تأثیر ایوان در کاهش بار حرارتی و مصرف حامل‌های انرژی در طول سال، نمایش می‌دهند.

الکتریکی کلی در هر دو حالت تقریباً یکسان است. با این حال، در بررسی جزئیات مصرف، تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود:

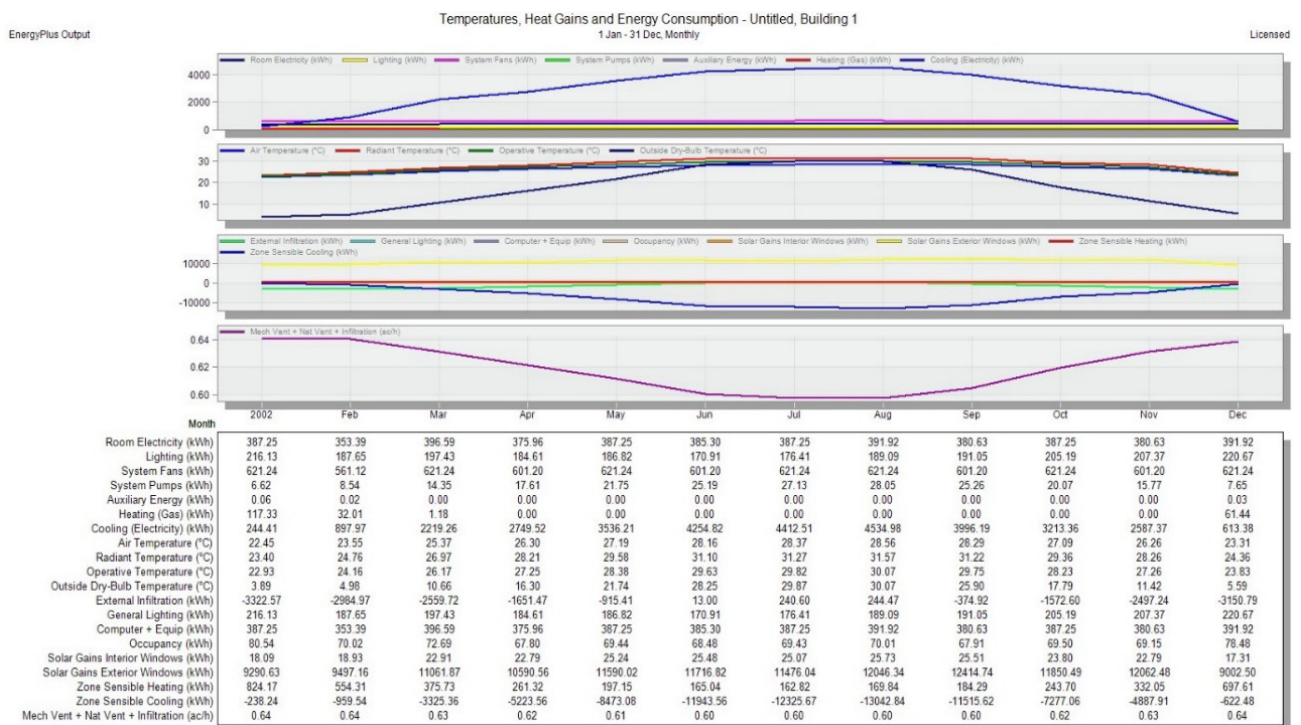
– مصرف روشنایی در حالت بدون ایوان اندکی کمتر از حالت با ایوان است.

– فن‌های سیستم مکانیکی در حالت با ایوان انرژی کمتری مصرف می‌کنند، در حالی که پمپ‌های سیستم و انرژی کمکی در حالت بدون ایوان کیلووات‌ساعت کمتری دارند.

– مصرف گاز برای گرمایش در حالت با ایوان بیشتر است، اما برق مصرفی سیستم خنک‌کننده در حالت بدون ایوان افزایش



شکل ۳. نمودار ماهانه دما، افزایش گرما (حرارتی) و مصرف انرژی در حالت بدون ایوان.



شکل ۴. نمودار ماهانه دما، افزایش گرما (حرارتی) و مصرف انرژی در حالت با ایوان.

—روشنایی عمومی، تجهیزات الکتریکی و کامپیوترها: در هر دو حالت مصرف برابری دارند.

— میزان اشغال^{۱۶} در حالت بدون ایوان، میزان مصرف مگاوات ناشی از حضور افراد اندکی بالاتر است.

– پنجره‌های داخلی و خارجی: در حالت با ایوان، نوسانات حرارتی و مصرف انرژی برای تنظیم دما کمتر است، که حاکی از عملکرد مؤثر ایوان در کنترل تابش خورشید می‌باشد.

— گرمایش و سرمایش محسوس: در حالت با ایوان، گرمایش محسوس کمی، بیشتر و سرمایش محسوس کمتر است.

— دبی هوای تهویه^{۱۷} در هر دو حالت طی ۱۱ ماه برابر بوده و تنها در ماه سپتامبر، حالت با ایوان دبی هوای بالاتر اندکی دارد. به‌طور کلی، نتایج حاکی از آن است که وجود ایوان موجب کاهش مصرف انرژی گرمایشی در زمستان، بهبود عملکرد حرارتی ساختمان، و تعادل در تبادل انرژی فصلی می‌شود. اگرچه ممکن است در فصول گرم اندکی مصرف سرمایشی را افزایش دهد. «جدول ۶» مصرف سالانه انرژی را به تفکیک حامل‌های انرژی، نشان داده است.

مشاهده و مقایسه مصرف برق سالیانه نشان می‌دهد: در حالت با ایوان مصرف بالاتری صورت گرفته و در حالت بدون ایوان مصرف برق کمتر شده است. همچنین در خصوص مصرف برق ماهیانه می‌توان گفت: در حالت با ایوان در تمام ماه‌های سال مصرف بالاتری صورت گرفته و در حالت بدون ایوان مصرف برق کمتر شده است.

با مقایسه مصرف گاز سالیانه مشاهده می‌کنیم که حالت بدون ایوان سهم مصرف گاز بیشتر شده است. در مقایسه مصرف گاز ماهیانه نیز می‌توان گفت: در حالت بدون ایوان سهم مصرف گاز کمتر شده است.

نتایج مقایسه داده‌های شبیه‌سازی در دو حالت «با ایوان» و «بدون ایوان» نشان می‌دهد که مصرف کل انرژی الکتریکی اتاق در طول سال در هر دو حالت یکسان است. با این حال، در بررسی جزئیات، تفاوت‌هایی میان اجزای مختلف سیستم‌ها مشاهده می‌شود:

— مصرف روشنائی^{۱۴} در حالت بدون ایوان اندکی بیشتر از حالت سازه انداز ایوان است، که به دلیل دریافت نور طبیعی کمتر در نبود سازه انداز ایوان می باشد.

— مصرف فن‌های سیستم مکانیکی: در حالت با ایوان، مقدار انرژی مورد نیاز برای فن‌ها کمی بیشتر است، که نشان‌دهنده افزایش تبادل حرارتی ناشی از حضور ایوان و نیاز به تهویه بیشتر است.

– پمپ‌های سیستم و انرژی کمکی: در حالت بدون ایوان، پمپ‌ها کیلووات‌ساعت کمتری مصرف کرده و انرژی کمکی نیز در این حالت مقداری بالاتر است.

— گرمایش گازی در سه ماه نخست سال، مصرف گاز در حالت
با ایوان به طور محسوسی کمتر از حالت بدون ایوان است که
نشان دهنده نقش ایوان در حفظ حرارت داخلی در فصول سرد
است.

– مصرف خنک‌کننده برقی در حالت با ایوان، مصرف برق سیستم سرمایشی بیشتر است؛ این افزایش ناشی از تأثیر حرارتی ایوان بر بار سرمایش در فصول گرم می‌باشد.

— دمای داخلی و تابشی: در حالت بدون ایوان، دمای هوای داخلی، دمای تابشی میانگین و دمای عملیاتی اندکی بالاتر از حالت با ایوان است، در حالی که دمای خشک بیرونی در هر دو حالت تقریباً یکسان باقی می ماند.

– نفوذ هوای خارجی^{۱۵} در حالت بدون ایوان، نفوذ هوا و در نتیجه مصرف مگاوات ساعت مربوط به آن بیشتر است.

جدول ۶. مصرف سالانه انرژی به تفکیک حامل‌های انرژی.

ساليانه	نوامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	اوت	ژوئيه	ژوئن	مه	آوريل	مارس	فوريه	ژانويه		
۵۱۸۱۵	۲۲۳۶	۴۱۴۳	۴۸۱۶	۵۵۴۱	۶۰۶۸	۵۸۹۰	۵۶۸۹	۵۰۲۴	۴۲۳۶	۳۸۴۶	۲۴۷۱	۱۸۵۴	برق (کيلو وات ساعت)	بدون ايوان
۶۱.۵	۲۸,۲۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۷۲,۱	۳۹,۴۳	گاز (کيلو وات ساعت)	
۴۷۷۳۱	۱۸۵۵	۳۷۹۲	۴۴۴۷	۵۱۹۴	۵۷۶۵	۵۶۲۵	۵۴۳۷	۴۷۵۳	۳۹۲۹	۳۴۴۹	۲۰۰۹	۱۴۷۶	برق (کيلو وات ساعت)	يوان دار
۲۱۲	۴۴,۶۱	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۰۰,۰	۱,۱۸	۳۲	۱۱۷	(کيلو وات ساعت)	



۴. بحث و تحلیل

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که حضور ایوان و جهت‌گیری آن در ساختمان واقع در اقلیم گرم و خشک استان تهران، تأثیر قابل‌توجهی بر شاخص‌های آسایش حرارتی و مصرف انرژی دارد. در این بخش به تفسیر این نتایج، مقایسه با مطالعات پیشین و تحلیل علل تفاوت‌های مشاهده‌شده می‌پردازیم.

۴.۱. نتایج کاربردی

– **نقش ایوان در تعدیل دمای داخلی:** بر اساس نتایج شبیه‌سازی، میانگین دمای عملیاتی در حالت دارای ایوان حدود $0.4 - 0.6^{\circ}\text{C}$ کمتر از حالت بدون ایوان بود. این موضوع نشان می‌دهد که ایوان به عنوان فضای واسط میان داخل و بیرون، با کاهش تابش مستقیم و تبادل حرارتی، پایداری دمایی ساختمان را افزایش می‌دهد. مطالعات مشابه نیز تأکید کرده‌اند که فضاهای نیمه‌باز مانند حیاط و ایوان می‌توانند بار سرمایشی ساختمان را بین ۸ تا ۱۸ درصد کاهش دهند (Diz-Mellado et al., 2023). از دیدگاه آسایش حرارتی، ثبات دمای داخلی و کاهش نوسان حرارتی از مهم‌ترین عوامل افزایش رضایت حرارتی کاربران محسوب می‌شود (Carlucci et al., 2021).

– **جهت‌گیری ایوان و تأثیر فصلی:** نتایج نشان داد که ایوان جنوبی در فصول گرم عملکرد بهتری دارد، در حالی که در فصول سرد تفاوت میان ایوان شمالی و حالت بدون ایوان کمتر است. این یافته‌ها با نتایج Hassan (۲۰۲۴) همخوان است که نشان داد جهت‌گیری مطلوب حیاط در اقلیم‌های گرم می‌تواند تا چند درجه دمای داخلی را کاهش دهد. در تابستان، زاویه تابش و شدت حرارت از جنوب و جنوب‌غرب افزایش می‌یابد، لذا وجود ایوان در این جهت می‌تواند با ایجاد سایه و تهویه طبیعی مناسب، شرایط آسایش را حفظ کند (Zhu et al., 2022).

– **مصرف انرژی و تهویه طبیعی:** اگرچه مصرف کلی برق در هر دو حالت مشابه است، اما در حالت دارای ایوان مصرف فن‌ها و سرمایش برقی کاهش یافته است. این موضوع تأییدکننده یافته‌های مطالعاتی است که حضور ایوان و حیاط را عاملی مؤثر در افزایش تهویه طبیعی و کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی می‌دانند (López et al., 2018).

همچنین کاهش مصرف گاز در فصول سرد در حالت دارای ایوان، بیانگر نقش این فضا در جلوگیری از اتلاف حرارت و بهبود راندمان انرژی است (Chatzipoulka et al., 2022).

۴.۲. محدودیت‌ها و ملاحظات طراحی

در این پژوهش از سیستم تهویه طبیعی استفاده شده و سیستم‌های مکانیکی مدل‌سازی نشده‌اند، بنابراین در شرایط واقعی ممکن است نتایج متفاوت باشند. علاوه‌براین، دقت شبیه‌سازی‌ها به ورودی‌های مدل وابسته است و پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی مدل با داده‌های واقعی محیطی اعتبارسنجی شود (Sharples et al., 2022).

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که حضور ایوان در طراحی ساختمان‌های اقلیم گرم و خشک، نقشی مؤثر در بهبود عملکرد حرارتی، افزایش آسایش حرارتی، و کاهش مصرف انرژی دارد. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر بیانگر آن است که ایوان جنوبی، به‌ویژه در فصول گرم سال، توانسته است میانگین دمای داخلی و شاخص نارضایتی حرارتی (PPD) را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. در مقابل، حذف ایوان یا استقرار آن در جهت شرقی و غربی باعث افزایش نوسانات حرارتی و نیاز بیشتر به انرژی سرمایشی شده است.

در تحلیل انرژی، مشاهده شد که وجود ایوان موجب کاهش بار سرمایشی تا حدود ۱۰ درصد و افزایش کارایی تهویه طبیعی می‌شود. همچنین، دمای عملیاتی در حالت دارای ایوان حدود نیم درجه سانتی‌گراد پایین‌تر از حالت بدون ایوان بوده و شاخص PMV به محدوده آسایش نزدیک‌تر شده است.

از نظر طراحی اقلیمی، ایوان نقش یک فیلتر حرارتی و نوری را ایفا کرده و با کنترل تابش خورشید و افزایش تبادل حرارتی طبیعی، موجب پایداری دمایی فضاهای داخلی می‌گردد. بنابراین، استفاده هدفمند از ایوان در جبهه جنوبی ساختمان‌ها در اقلیم گرم و خشک، به‌ویژه در مناطق شهری متراکم، می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش مصرف انرژی و بهبود آسایش کاربران باشد. همچنین باید توجه داشت که تأثیرات دمای صبحگاهی در ایوان شرقی در برخی مواقع سال باعث کاهش میزان گرمایش مورد نیاز ساختمان خواهد شد.

از منظر کاربردی، یافته‌های این پژوهش می‌تواند در طراحی ساختمان‌های اقلیم‌های گرم و خشک مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، تأثیر ابعاد هندسی ایوان، مصالح بومی و رفتار واقعی کاربران در شرایط اقلیمی متغیر نیز مورد بررسی میدانی قرار گیرد تا مدل شبیه‌سازی‌شده از اعتبار بیشتری برخوردار شود.

پی‌نوشت‌ها

1. EnergyPlus
2. DesignBuilder
3. PMV/PPD
4. CFD، ENVI-met، EnergyPlus / DesignBuilder
۵. CFD برای جریان و ENVI-met برای میکروکلیمات، EnergyPlus/DesignBuilder برای عملکرد انرژی داخلی
۶. PMV، PPD و شاخص‌های اقلیمی بیرونی
7. Climate Consultant
8. Fanger PMV = Predicted Mean Vote
9. Fanger PPD = Predicted Percentage of Dissatisfied
10. Infiltration
11. Occupancy
12. Zone Sensible Heating
13. Zone Sensible Cooling
14. Lighting Energy
15. Infiltration
16. Occupancy
17. Mech Vent + Nat Vent + Infiltration

فهرست منابع

- احمدی، ف. (۱۳۸۴)، حیاط مرکزی در معماری ایران، نشریه صفه، (۴۱)، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری.
- آزادی‌فر، ا.؛ عمرانی‌پور، ع.؛ مسعودی‌نژاد، م.؛ وفامهر، م. (۱۴۰۰)، بازخوانی هندسه حیاط مرکزی در دستیابی به نور روز در خانه‌های قاجاری کاشان، معماری و شهرسازی پایدار، ۹ (۱)، ۷۷-۹۵. <https://doi.org/10.22061/jsaud.2021.6468.1671>
- بشارت، ح.؛ کبانیان، س. (۱۴۰۰)، تأثیر سیستم‌های سرمایش غیرفعال در خانه‌های حیاط مرکزی در اقلیم گرم و خشک ایران، گزارش‌های انرژی، ۱۴۰۵-۱۴۱۷. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.093>
- تقی‌پور، م.؛ قهرمان‌ایزدی، ن.؛ اسکندری، ح.؛ موحد، خ. (۱۴۰۲)، تحلیل رفتار فرم حیاط مرکزی در تهویه طبیعی خانه‌های سنتی اقلیم گرم و خشک ساحلی به روش CFD (مطالعه موردی: عمارت دهدشتی بوشهر)، فضای زیست، ۳ (۲)، ۱۱۳-۱۳۶. <https://doi.org/10.22094/>
- حسنی لیجایی، ب.؛ حیدری، ش.؛ مفیدی‌شمیرانی، س. م. (۱۴۰۱)، بررسی آسایش حرارتی در فضاهای نیمه‌باز؛ مطالعه موردی خانه‌های بومی شهر رشت، معماری و شهرسازی پایدار، ۱۰ (۲)، ۱۶۵-۱۸۴. <https://doi.org/10.22061/jsaud.2022.8201.1935>
- دهقان، ن.؛ اکرمی، ف.؛ ملکی، ع. (۱۴۰۱)، بررسی رفتار حرارتی ایوان در خانه‌های سنتی اصفهان با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی، اندیشه معماری، ۶ (۱۱)، ۱۱۵-۱۳۵. <https://doi.org/10.30479/at.2022.13511.1550>
- رهابی، ا. (۱۴۰۰)، بررسی تأثیر تغییرات کالبدی حیاط مرکزی بر الگوی جریان هوا با روش CFD، معماری و شهرسازی پایدار، ۹ (۲)، ۲۵-۴۶. <https://doi.org/10.22061/jsaud.2021.6012.1597>
- قهرمان‌ایزدی، ن.؛ تقی‌پور، م.؛ اسکندری، ح.؛ موحد، خ. (۱۴۰۲)، تأثیر فرم و بازوها در تهویه طبیعی خانه‌های حیاط مرکزی اقلیم گرم و مرطوب، معماری و شهرسازی پایدار، ۱۱ (۲)، ۱۶۵-۱۸۱. <https://doi.org/10.22061/jsaud.2023.9557.2124>
- کریم‌زاده، ج.؛ مهدی‌نژاد درزی، ج.؛ کریمی، ب. (۱۴۰۱)، سنجش عملکرد ایوان در بهبود آسایش حرارتی خانه‌های تاریخی شیراز، مطالعات معماری ایران، ۱۰ (۲۰)، ۸۹-۱۱۵. <https://doi.org/10.22052/jias.2022.111875>
- Aldawoud, A. J. (2008). Thermal performance analysis of courtyard buildings in hot climates. *Energy and Buildings*, 40 (10), 1928–1936. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.07.007>
- ASHRAE Standard 55-2017: *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*
- Carlucci, S., Corgnati, S. P., & Pagliano, L. (2021). Extending the adaptive thermal comfort models for courtyards. *Building and Environment*, 197, 107810. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107810>
- Chatzipoulka, C., Steemers, K., & Nikolopoulou, M. (2022). The role of outdoor courtyard design variables in microclimate performance. *Building Simulation*, 15 (2), 224–240. <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0831-4>
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., ... Strand, R. K. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33 (4), 319–331. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)



- Diz-Mellado, E., López-Cabeza, A., & Jiménez, M. J. (2023). *Unravelling the impact of courtyard geometry on cooling demand: A parametric simulation study. Energy and Buildings*, 290, 113523. <https://doi.org/10.1016/j.en-build.2023.113523>
- Eskandari, H., Saedvandi, M., & Mahdavinnejad, M. (2018). The impact of Iwan as a traditional shading device on the building energy consumption. *Buildings*, 8 (1), 3. <https://doi.org/10.3390/buildings8010003>
- Fanger, P.O. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press, 1970.
- Fouquier, A., Robert, S., Suard, F., Stéphan, L., & Jay, A. (2013). State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 272–288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.004>
- Fumo, N. (2014). A review on the basics of building energy estimation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.040>
- Ghaffarianhoseini, A., Berardi, U., & Ghaffarianhoseini, A. (2015). Thermal performance characteristics of unshaded courtyards in hot and humid climates. *Building and Environment*, 87, 154–168. <https://doi.org/10.1016/J.BUILD-ENV.2015.02.001>
- Hao, S., et al. (2019). The effects of courtyards on the thermal performance of a vernacular house in subtropical climate. *Energies*, 12 (6), 1042. <https://doi.org/10.3390/en12061042>
- Hassan, A. M. S. (2024). *Courtyard geometry's effect on energy consumption of residential buildings in hot and dry climates. Scientific Reports*, 14, 2567. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60487-8>
- López, L., Fernández, F., & Molina, J. (2018). *Reviewing the thermal and microclimatic function of courtyards. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 580–595. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.055>
- Meir, I. A., Pearlmutter, D., & Etzion, Y. (1995). On the microclimatic behavior of two semi-enclosed attached courtyards in a hot dry region. *Building and Environment*, 30 (4), 563–572. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(95\)00018-2](https://doi.org/10.1016/0360-1323(95)00018-2)
- Muhaisen, A. S. (2006). Shading simulation of the courtyard form in different climatic regions. *Building and Environment*, 41 (12), 1731–1741. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.012>
- Muhaisen, A. S., & Gadi, M. B. (2006). Effect of courtyard proportions on solar heat gain and energy requirement in the temperate climate of Rome. *Building and Environment*, 41 (3), 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.031>
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Lighting Research & Technology*, 38 (1), 41–59. <https://doi.org/10.1191/1365782805li128oa>
- Ochoa, C. E., Aries, M. B. C., van Loenen, E. J., & Hensen, J. L. M. (2012). Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. *Applied Energy*, 95, 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.042>
- Reinhart, C. F., & Wienold, J. (2010). The Daylighting Dashboard — a simulation-based design analysis for daylit spaces. *Building and Environment*, 46 (2), 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.001>
- Sadafi, N., Salleh, E., Lim, C. H., & Jaafar, Z. (2011). Evaluating thermal effects of internal courtyard in a tropical terrace house by computational simulation. *Energy and Buildings*, 43 (4), 887–893. <https://doi.org/10.1016/j.en-build.2010.12.009>
- Safarzadeh, F., & Bahadori, M. N. (2005). Passive cooling in traditional Iranian architecture. *Building and Environment*, 40 (8), 955–963. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.04.014>
- Shaeri, J., Yaghoubi, M., & Habibi, A. (2018). Influence of Iwans on the thermal comfort of talar rooms in traditional houses: A study in Shiraz, Iran. *Buildings*, 8 (6), 81. <https://doi.org/10.3390/buildings8060081>
- Sharples, S., Yezioro, A., & Givoni, B. (2022). *Shade and thermal comfort in courtyards: Experimental versus simulation study. Buildings*, 12 (11), 1961. <https://doi.org/10.3390/buildings12111961>
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2003). Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy and Buildings*, 35 (1), 61–68. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00080-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00080-4)
- Soflaei, F., Shokouhian, M., & Mofidi Shemirani, S. M. (2016). Investigation of Iranian traditional courtyard as passive cooling strategy (a field study on BS climate). *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5 (1), 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.12.001>
- Soflaei, F., Shokouhian, M., Tabadkani, A., Moslehi, H., & Berardi, U. (2020). A simulation-based model for courtyard housing design based on adaptive thermal comfort. *Journal of Building Engineering*, 31, 101335. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101335>

- Sun, Q., Luo, Z., & Bai, L. (2023). The impact of internal courtyard configuration on thermal performance of long strip houses. *Buildings*, 13 (2), 371. <https://doi.org/10.3390/buildings13020371>
- Tabadkani, A., Aghasizadeh, S., Banihashemi, S., & Hajirasouli, A. (2022). Courtyard design impact on indoor thermal comfort and utility costs for residential households: Comparative analysis and deep-learning predictive model. *Frontiers of Architectural Research*, 11 (5), 963–980. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.02.006>
- Taleghani, M., Tenpierik, M., van den Dobbelsteen, A., & Sailor, D. J. (2014a). Heat in courtyards: A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands. *Solar Energy*, 103, 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.033>
- Taleghani, M., Tenpierik, M. J., & van den Dobbelsteen, A. (2014b). Energy performance and thermal comfort of courtyard/atrium dwellings in the Netherlands in the light of climate change. *Renewable Energy*, 63, 486–497. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.028>
- Yaşa, E., & Ok, V. (2014). Evaluation of the effects of courtyard building shapes on solar heat gains and energy efficiency according to different climatic regions. *Energy and Buildings*, 73, 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.042>
- Zamani, Z., Heidari, S., & Hanachi, P. (2018). Reviewing the thermal and microclimatic function of courtyards. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 580–595. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.055>
- Zhang, L., et al. (2017). The CTTC model for predicting courtyard air temperature in South China. *Building Simulation*, 10 (5), 663–676. <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0364-1>
- Zhu, L., Yang, J., & Wang, T. (2022). Study on strategy for optimization of thermal comfort of college courtyards. *Atmosphere*, 14 (11), 1685. <https://doi.org/10.3390/atmos14111685>
- Zhou, X., Liu, R., Tian, S., Shen, X., Yang, X., An, J., & Yan, D. (2023). A review of validation methods for building energy modeling programs. *Building Simulation*, 16 (11), 2027–2047. <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1050-0>
- Zuhaib, S., Hajdukiewicz, M., & Goggins, J. (2019). Application of a staged automated calibration methodology to a partially-retrofitted university building energy model. *Journal of Building Engineering*, 26, 100866. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100866>