

Effects of Central Courtyard Enclosure Degree on Building Thermal and Energy Performance: A Numerical Simulation Study in a Hot and Dry Climate

Ahmadreza Keshtkar Ghalati^{1*} , Shabnam Mahmoud Roudbari² , Ali Sadeghi Habibabad³ 

1. Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Kharazmi University, Tehran, Iran, a.keshtkar@khu.ac.ir.

2. Master Graduate in Architecture and Energy, Rassam Institute of Higher Education, Karaj, Iran, mechanical_mahmoudi@yahoo.com.

3. Assistant Professor, Architectural Engineering Department, Faculty of Technical and Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran, alisadeghi@yu.ac.ir.

Research Article

Abstract

Central courtyards are widely recognized as passive design elements that can influence the environmental performance of residential buildings in hot and dry climates. However, the effects of courtyard enclosure degree remain difficult to isolate because previous studies have often examined changes in courtyard geometry together with other building and operational parameters. This study investigates the effect of central courtyard enclosure degree on building performance through a controlled comparative numerical simulation approach. Three courtyard configurations, including a base case with the lowest enclosure degree, a semi-open courtyard, and a closed courtyard, were modeled using DesignBuilder with the EnergyPlus simulation engine. To enable a direct comparison, geometric characteristics, materials, building orientation, climatic data, and occupancy conditions were kept constant across the scenarios, while courtyard enclosure degree was treated as the independent variable. The performance of the three configurations was evaluated using indoor air temperature, thermal comfort indices, natural ventilation rate, useful daylight, glare, and annual energy consumption. The results indicate that, within the range of scenarios examined, lower courtyard enclosure was associated with higher natural ventilation rates, improved access to daylight, better thermal comfort conditions, and lower annual energy consumption. The lowest-enclosure base case showed the lowest annual energy consumption and lower thermal dissatisfaction compared with the more enclosed configurations. In contrast, differences in mean indoor air temperature among the scenarios were relatively limited, indicating that thermal performance cannot be explained solely by courtyard form. The findings further suggest that the environmental performance of courtyard buildings results from the interaction of enclosure degree with factors such as solar exposure, natural ventilation, and material characteristics. This finding, while preserving the value of vernacular patterns, shows that the role of design parameters is highly dependent on the conditions and how they interact. Therefore, the results should not be interpreted as evidence for a universally optimal courtyard form or a fixed enclosure threshold. Instead, courtyard enclosure can be considered a design variable whose performance implications depend on the geometric, climatic, and operational conditions of the building. The results of this study can serve as a basis for developing climate-responsive design strategies for residential buildings.

*Corresponding Author:

Ahmadreza Keshtkar
Ghalati
a.keshtkar@khu.ac.ir

Received: 2026/05/10

Accepted: 2026/09/01

Keywords: Central Courtyard, Thermal Comfort, Hot-Arid Climate, Energy Simulation, Natural Ventilation.

Cite this article: Keshtkar Ghalati, A., Mahmoud Roudbari, Sh., & Sadeghi Habibabad, A. (2026). Effects of Central Courtyard Enclosure Degree on Building Thermal and Energy Performance: A Numerical Simulation Study in a Hot and Dry Climate. *Journal of Architectural and Environmental Research*, 4(6), 63-78. <https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2088399.1214>



Print ISSN: 2588-6363
Online ISSN: 2981-247X

<https://jaer.znu.ac.ir/>

Authors 

University of Zanjan



DOI: 10.30470/jaer.2026.2088399.1214

نقش درجه محصوریت حیاط مرکزی در عملکرد حرارتی و انرژی ساختمان: یک مطالعه شیبه‌سازی عددی در اقلیم گرم و خشک

احمد رضا کشت‌کار قلاتی^{۱*}، شبنم محمود رودباری^۲، علی صادقی حبیب‌آباد^۳

۱. استادیار، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، a.keshtkar@khu.ac.ir
۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد معماری و انرژی، مؤسسه آموزش عالی رسام، کرج، ایران، mechanical_mahmoudi@yahoo.com
۳. استادیار مهندسی معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران، alisadeghi@yu.ac.ir

مقاله پژوهشی

چکیده:

این پژوهش به ارزیابی تأثیر درجه محصوریت حیاط مرکزی بر عملکرد حرارتی، نوری و مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم گرم و خشک می‌پردازد. برای این منظور، سه سناریوی «حیاط با کمترین محصوریت (حالت پایه و مقایسه‌ای)»، «حیاط نیمه‌باز» و «حیاط بسته» با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر با موتور انرژی‌پلاس و تحت شرایط کنترل شده مدل‌سازی و مقایسه شدند. در تمامی سناریوها، پارامترهای هندسی، مصالح و شرایط بهره‌برداری ثابت در نظر گرفته شد و تنها متغیر مستقل، میزان محصوریت حیاط بود. نتایج نشان می‌دهد که کاهش محصوریت حیاط با افزایش نرخ تهویه طبیعی و بهبود دسترسی به نور روز همراه است. در سناریوی با کمترین محصوریت، مقادیر پایین‌تری از بار سرمایشی و مصرف انرژی سالانه نسبت به سایر سناریوها مشاهده شد. در حالی که سناریوی حیاط بسته مقادیر بالاتری را نشان داد. با این حال، اختلاف دمای میانگین داخلی بین سناریوها محدود بوده و بیانگر آن است که عملکرد حرارتی ساختمان تنها به فرم حیاط وابسته نیست. تحلیل هم‌زمان شاخص‌های حرارتی، نوری و انرژی نشان می‌دهد که تأثیر فرم حیاط تابعی از برهم‌کنش چندین عامل از جمله تهویه طبیعی، تابش خورشیدی و ویژگی‌های مصالح است. این یافته، ضمن حفظ ارزش آگوهایی بومی در اقلیم گرم و خشک، نشان می‌دهد که نقش پارامترهای طراحی به شدت وابسته به شرایط و نحوه تعامل آن‌هاست. در مجموع، این پژوهش با ارائه یک تحلیل مقایسه‌ای کنترل شده و چندشاخصه، امکان بررسی مستقیم اثر درجه محصوریت حیاط را فراهم کرده و نشان می‌دهد که ارزیابی عملکرد حیاط مرکزی نمی‌تواند به انتخاب یک فرم ثابت محدود شود و نیازمند بررسی هم‌زمان چند شاخص عملکردی و شرایط طراحی است. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای توسعه راهبردهای طراحی اقلیمی در ساختمان‌های مسکونی مورد استفاده قرار گیرد.

* نویسنده مسئول:

احمد رضا کشت‌کار قلاتی
a.keshtkar@khu.ac.ir

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰

انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰

واژگان کلیدی:

حیاط مرکزی، آسایش حرارتی، اقلیم گرم و خشک، شبیه‌سازی انرژی، تهویه طبیعی.

استاد به این مقاله کشت‌کار قلاتی، احمد رضا محمود رودباری، شبنم و صادقی حبیب‌آباد علی (۱۴۰۵) نقش درجه محصوریت حیاط مرکزی در عملکرد حرارتی و انرژی ساختمان: یک مطالعه شبیه‌سازی عددی در اقلیم گرم و خشک، نشریه پژوهش‌های معماری و محیط، ۷۸-۶۳ (۹۴).

<https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2088399.1214>



پدیاورندگان

<https://jaer.znu.ac.ir/>

شابا چاپی: ۶۳۶۳-۲۵۸۸
شابا الکترونیکی: ۲۹۸۱-۲۳۶۸



دانشگاه زنجان

مقدمه

حیاط مرکزی یکی از الگوهای پایدار و دیرپا در معماری مناطق گرم و خشک است که علاوه بر سازمان دهی فضایی و پاسخ به نیازهای اقلیمی و محرمیت، می تواند به عنوان یک عنصر غیرفعال^۱ در تعدیل شرایط محیطی ساختمان عمل کند. قرارگیری فضای باز در میان توده ساختمان، امکان تأثیرگذاری بر دریافت تابش خورشیدی، سایه اندازی، تبادل هوا و دسترسی به نور طبیعی^۲ را فراهم می کند و از این طریق می تواند بر آسایش حرارتی^۳ و مصرف انرژی^۴ فضاهای پیرامونی اثرگذار باشد. از این رو، شناخت رابطه میان ویژگی های کالبدی حیاط و عملکرد محیطی ساختمان، به ویژه در ساختمان های مسکونی واقع در اقلیم های گرم و خشک، اهمیت دارد.

در میان ویژگی های هندسی حیاط مرکزی، درجه محصوریت^۵ یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر نحوه ارتباط فضای حیاط با آسمان و محیط پیرامون است. تغییر میزان محصوریت می تواند همزمان الگوی سایه اندازی، دریافت تابش، دسترسی به نور طبیعی و جریان هوا را تغییر دهد. بنابراین، افزایش یا کاهش محصوریت لزوماً پیامدی یکسان برای همه ابعاد عملکرد ساختمان ندارد. برای مثال، کاهش محصوریت می تواند دسترسی به آسمان و امکان تبادل هوا و تهویه طبیعی را افزایش دهد، اما همزمان دریافت تابش خورشیدی را نیز تحت تأثیر قرار دهد. در نتیجه، ارزیابی اثر محصوریت بر اساس تنها یک شاخص، نمی تواند پیچیدگی این روابط متقابل را به طور کامل نشان دهد.

اگرچه سنت معماری در اقلیم گرم و خشک عمدتاً بر حیاط های محصور و درون گرا برای مقابله با تابش شدید خورشیدی تأکید دارد، اما بررسی رفتار عملکردی این الگوها در شرایط مختلف و پاسخ به این پرسش که تا چه حد تغییرات کالبدی و کاهش محصوریت می تواند پویایی حرارتی و مصرف انرژی را تحت تأثیر قرار دهد، نیازمند تحلیل های عددی^۶ دقیق است. یکی از چالش های موجود در این زمینه، تفکیک اثر درجه محصوریت از سایر عوامل مؤثر بر عملکرد ساختمان است. در مقایسه فرم های مختلف حیاط، تغییر همزمان متغیرهایی مانند هندسه ساختمان، مصالح، شرایط بهره برداری و عوامل اقلیمی می تواند تفسیر نتایج را دشوار کند. از این رو، برای ارزیابی دقیق تر نقش محصوریت، لازم است سایر شرایط مؤثر تا حد امکان ثابت نگه داشته شوند و تغییر عملکرد ساختمان در نتیجه تغییر این ویژگی هندسی به صورت مستقیم مقایسه شود. همچنین، بررسی همزمان شاخص های حرارتی، تهویه، روشنایی و انرژی می تواند تصویر جامع تری از پیامدهای تغییر محصوریت ارائه دهد. بر این اساس، مسئله اصلی پژوهش حاضر، بررسی اثر درجه محصوریت حیاط مرکزی بر عملکرد چندشاخصه ساختمان تحت شرایط کنترل شده است. در این پژوهش، درجه محصوریت به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده و سایر پارامترهای اصلی هندسی، مصالح و شرایط بهره برداری در سناریوهای مورد مطالعه (شامل حیاط با کمترین محصوریت، نیمه باز و بسته) ثابت نگه داشته می شوند. سپس عملکرد سناریوها از نظر شرایط حرارتی و آسایش حرارتی، تهویه طبیعی^۸، روشنایی روز و مصرف انرژی مورد مقایسه قرار می گیرد.

هدف پژوهش، تبیین چگونگی ارتباط تغییر درجه محصوریت حیاط مرکزی با عملکرد محیطی ساختمان های مسکونی در اقلیم گرم و خشک از طریق شبیه سازی عددی^۹ است. رویکرد مقایسه ای کنترل شده پژوهش، امکان بررسی مستقیم سناریوهای مختلف محصوریت را فراهم می کند و می تواند به درک بهتر نقش هندسه حیاط در طراحی اقلیمی و تصمیم گیری های مبتنی بر عملکرد کمک کند. نتایج نیز با هدف تعیین یک فرم مطلق و عمومی برای حیاط مرکزی ارائه نمی شوند، بلکه بر مقایسه عملکرد سناریوهای بررسی شده در محدوده شرایط تعریف شده پژوهش و ایجاد تعادل میان متغیرهای طراحی تمرکز دارند.

پرسش های پژوهش

با توجه به نقش درجه محصوریت حیاط مرکزی در شکل گیری شرایط محیطی ساختمان و با هدف بررسی این رابطه در شرایط کنترل شده، پژوهش حاضر اثر تغییر درجه محصوریت را بر مجموعه ای از شاخص های عملکردی ساختمان بررسی می کند. بر این اساس، پرسش های اصلی پژوهش عبارتند از:

۱. درجه محصوریت حیاط مرکزی چه تأثیری بر شرایط حرارتی و آسایش حرارتی ساختمان های مسکونی در اقلیم گرم و خشک دارد؟

۲. تغییر درجه محصوریت حیاط مرکزی چه تأثیری بر عملکرد تهویه طبیعی و روشنایی روز ساختمان دارد؟

۳. درجه محصوریت حیاط مرکزی چگونه بر مصرف سالانه انرژی ساختمان اثر می‌گذارد و چه رابطه‌ای میان تغییرات عملکرد حرارتی، تهویه و روشنایی با مصرف انرژی وجود دارد؟

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر درجه محصوریت حیاط مرکزی بر عملکرد حرارتی، نوری و مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم گرم و خشک، با استفاده از شبیه‌سازی عددی و تحلیل مقایسه‌ای در شرایط کنترل شده انجام شده است.

۱. مدل‌سازی ساختمان

یک الگوی مرجع از خانه حیاط مرکزی بر اساس نمونه‌های متداول در شهر یزد انتخاب شد. مدل سه‌بعدی ساختمان با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر^۱ و با بهره‌گیری از موتور محاسباتی انرژی‌پلاس توسعه یافت. مشخصات هندسی مدل شامل پلان مستطیلی با حیاط مرکزی، تعداد طبقات ثابت، ارتفاع طبقات، و نسبت مشخصی از بازشوها به سطح دیوار در تمامی سناریوها یکسان در نظر گرفته شد. همچنین جهت‌گیری ساختمان (شمال-جنوب)، ابعاد کلی و حجم ساختمان در تمامی حالت‌ها ثابت نگه داشته شد تا امکان مقایسه عادلانه فراهم شود.

۲. تعریف سناریوها و متغیر مستقل

متغیر مستقل پژوهش، درجه محصوریت حیاط مرکزی است که به صورت کمی بر اساس نسبت مجموع سطوح جلاره‌های پیرامونی به سطح باز حیاط تعریف شد. برای بررسی اثر این متغیر، سه سناریوی هندسی با درجات متفاوت محصوریت مدل‌سازی شد (جدول ۱).

جدول ۱. سناریوهای مورد مطالعه. تدوین: نگارندگان.

سناریو	توضیح	پلان گرافیکی	شبیه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر
حالت پایه (مقایسه‌ای)	حاکم نسبت سطح باز به جلاره‌ها؛ حذف همه جلاره‌های کناری و مقابل؛ ارتباط مستقیم با باد غالب و آسمان		
حیاط نیمه‌باز	نسبت متوسط سطح باز به جلاره‌ها؛ حذف یک جلاره مقابل؛ جریان هوا محدود اما مؤثر		
حیاط بسته	حفاظت نسبت سطح باز به جلاره‌ها؛ حفظ هر چهار جلاره با ارتفاع کامل؛ حداقل تهویه طبیعی		

در همه سناریوها، مساحت کل زیربنا، حجم ساختمان، مصالح، ابعاد بازشوها، جهت‌گیری، کاربری، الگوی بهره‌برداری و شرایط اقلیمی ثابت نگه داشته شد و تنها درجه محصوریت حیاط تغییر کرد. این رویکرد امکان مقایسه کنترل شده سناریوها و ارزیابی اثر مستقیم تغییر محصوریت بر شاخص‌های عملکردی ساختمان را فراهم می‌کند.

۳. مشخصات مصالح و خواص حرارتی

مصالح مورد استفاده شامل خشت، آجر، چوب، گچ، سفال و سنگ طبیعی بوده و خواص ترموفیزیکی آن‌ها (ضریب انتقال حرارت^{۱۲}، ظرفیت حرارتی ویژه^{۱۳} و چگالی^{۱۴}) بر اساس منابع معتبر و مقررات ملی ساختمان تعیین گردید. به منظور حذف اثر متغیرهای مداخله‌گر، ترکیب مصالح در تمامی سناریوها یکسان در نظر گرفته شد.

۴. داده‌های اقلیمی

داده‌های اقلیمی شهر یزد از داده‌های استاندارد نرم‌افزار شامل دمای خشک^{۱۵}، رطوبت نسبی^{۱۶}، تابش خورشیدی^{۱۷} و سرعت باد^{۱۸} استخراج و برای شبیه‌سازی سالانه^{۱۹} مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها نمایانگر یک سال اقلیمی معمول هستند.

۵. شرایط بهره‌برداری و فرضیات

شرایط بهره‌برداری شامل الگوی حضور ساکنان^{۲۰}، بارهای داخلی^{۲۱}، تجهیزات و روشنایی^{۲۲}، نرخ نفوذ هوا^{۲۳} و دمای تنظیمی^{۲۴}، بر اساس مقادیر استاندارد تعریف و در تمامی سناریوها ثابت نگه داشته شد. سیستم‌های مکانیکی نیز یکسان در نظر گرفته شدند. برای ارزیابی اثر مستقل فرم معماری، بارهای گرمایشی و سرمایشی^{۲۵} با استفاده از مدل سیستم هوای بار ایده‌آل^{۲۶} در انرژی پلاس شبیه‌سازی شد؛ بنابراین، نتایج بیانگر اثر تغییرات هندسی بر بارهای حرارتی موردنیاز ساختمان است، نه عملکرد واقعی تجهیزات مکانیکی یا مصرف نهایی آن‌ها (Crawley et al., 2001).

نرخ تهویه طبیعی^{۲۷} با استفاده از مدل جریان هوای چندمنطقه‌ای^{۲۸} انرژی پلاس و با در نظر گرفتن تبادل هوا از طریق بازشوها، اختلاف فشار^{۲۹} ناشی از باد و اثر دودکشی^{۳۰} محاسبه شد. شاخص‌های نور مفید روز و خیرگی^{۳۱} نیز در محیط دیزاین بیلدر و بر اساس مدل استاندارد آسمان^{۳۲} محاسبه شدند.

شاخص‌های ارزیابی شامل دمای متوسط هوای داخلی، آسایش حرارتی، نرخ تهویه طبیعی، نور مفید روز، مواجهه سالانه با تابش خورشیدی و مصرف سالانه انرژی بود. خروجی‌های ساعتی به مقادیر ماهانه و سالانه تبدیل و عملکرد سناریوها در شرایط یکسان مقایسه شد. برای بررسی اعتبار نتایج، روند تغییرات شاخص‌ها با مطالعات پیشین در زمینه عملکرد حرارتی حیاط مرکزی در اقلیم گرم و خشک مقایسه شد. با توجه به ماهیت شبیه‌سازی، عواملی مانند رفتار واقعی ساکنان، تغییرات پویای باز و بسته‌شدن پنجره‌ها و اثر پوشش گیاهی به صورت ساده‌سازی شده لحاظ شده‌اند.

پیشینه پژوهش

حیاط مرکزی یکی از عناصر مهم معماری بومی در اقلیم‌های گرم و خشک است که از طریق راهبردهایی مانند سایه‌اندازی، تهویه طبیعی، ذخیره حرارتی مصالح و حضور عناصر طبیعی می‌تواند بر شرایط خرداقلیمی و عملکرد محیطی ساختمان اثر بگذارد (Soflaei et al., 2016a; Soflaei, 2016b). با این حال، عملکرد آن به ویژگی‌های هندسی حیاط، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های کالبدی ساختمان وابسته است و تغییر این عوامل می‌تواند دریافت تابش، جریان هوا و تبادل حرارتی را تحت تأثیر قرار دهد.

در میان ویژگی‌های هندسی، نسبت ارتفاع به عرض^{۳۳}، عمق حیاط^{۳۴} و نحوه استقرار فضاهای پیرامونی بر تابش خورشیدی، سایه‌اندازی و رفتار حرارتی اثر گذارند. برخی مطالعات نشان داده‌اند که محصوریت بیشتر می‌تواند با کاهش دید به آسمان^{۳۵} و تابش مستقیم، به پایداری بیشتر شرایط خرداقلیمی و کاهش نوسانات دمایی^{۳۶} کمک کند (Aldawoud, 2008). در مقابل، حیاط‌های بازتر ممکن است ارتباط مؤثرتری با محیط بیرون و جریان هوا ایجاد کنند و از این طریق بر تهویه طبیعی و شرایط حرارتی اثر بگذارند (Gunasekaran & Priya, 2025). بنابراین، اثر محصوریت را نمی‌توان صرفاً بر اساس میزان سایه‌اندازی تفسیر کرد؛ تهویه طبیعی یکی از سازوکارهای اصلی عملکرد حیاط است، هندسه بازشوها، ارتباط حیاط با محیط بیرون و شرایط باد می‌توانند نرخ تعویض هوا و شرایط حرارتی فضاهای پیرامونی را تغییر دهند (Wu et al., 2023; Ma et al., 2025). با این حال، افزایش تهویه الزماً به تغییر محسوس دمای متوسط داخلی منجر نمی‌شود؛ زیرا عملکرد حرارتی ساختمان به عواملی مانند پوسته، جرم حرارتی، تابش و شرایط بهره‌برداری نیز وابسته است. از این رو، بررسی همزمان تهویه و شاخص‌های آسایش حرارتی برای ارزیابی اثر محصوریت ضروری است.

از منظر روشنایی، حیاط مرکزی می‌تواند به عنوان منبع تأمین نور طبیعی برای فضاهای پیرامونی عمل کند؛ افزایش بازبودن حیاط و دسترسی به آسمان معمولاً با افزایش نور مفید روز^{۳۷} و بهبود توزیع نور همراه است (Guedouh et al., 2025; Prakash et al., 2025). با این حال، افزایش دسترسی به آسمان می‌تواند دریافت تابش مستقیم را نیز افزایش دهد، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک (Sun et al., 2025)؛ بنابراین، عملکرد

نوری و حرارتی حیاط باید به‌صورت هم‌زمان ارزیابی شود. علاوه بر هندسه، مصالح و عناصر طبیعی نیز بر عملکرد حیاط اثرگذارند؛ مصالح با ظرفیت حرارتی بالا می‌توانند نوسانات دما را کاهش دهند (Zamani et al., 2019) و پوشش گیاهی و عناصر آبی از طریق تبخیر و تحریق بر شرایط حرارتی اثر می‌گذارند (Cho & Mohammadzadeh, 2013; Gomaa et al., 2024).

مرور مطالعات نشان می‌دهد که شواهد درباره اثر میزان محصوریت حیاط همواره هم‌گرا نیستند؛ برخی پژوهش‌ها بر مزایای محصوریت بیشتر در کنترل تابش و شرایط خرداقليمی تأکید دارند (Aldawoud, 2008)، در حالی که مطالعات دیگر نقش حیاط‌های بازتر را در تقویت تهویه طبیعی برجسته می‌کنند (Gunasekaran & Priya, 2025). بخشی از این تفاوت می‌تواند ناشی از تغییر هم‌زمان متغیرهای هندسی، کالبدی و بهره‌برداری در مطالعات مختلف باشد. از این رو، مقایسه سناریوهای دارای شرایط یکسان و تغییر تنها درجه محصوریت می‌تواند شواهد روشن‌تری درباره ارتباط این متغیر با عملکرد ساختمان فراهم کند.

خلاصه‌ای از ویژگی‌ها و تمرکز مطالعات پیشین پیرامون عملکرد حیاط مرکزی و متغیرهای مختلف آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. خلاصه پیشینه پژوهش. تلویح: نگارندگان.

ردیف	منبع پژوهش	محور مطالعه	یافته
۱	Soflaei et al. (2016a)	هندسه و عملکرد حیاط مرکزی	ویژگی‌های هندسی حیاط بر تابش، سایه‌اندازی و عملکرد حرارتی اثرگذار است.
۲	Soflaei (2016b)	راهبردهای غیرفعال حیاط مرکزی	حیاط از طریق راهبردهای غیرفعال در تعدیل شرایط محیطی نقش دارد.
۳	Aldawoud (2008)	هندسه و محصوریت حیاط	محصوریت بیشتر می‌تواند دریافت تابش و شرایط خرداقليمی را تغییر دهد.
۴	Gunasekaran & Priya (2025)	محصوریت و جریان هوا	باز بودن بیشتر می‌تواند بر جریان هوا و تهویه طبیعی اثرگذار باشد.
۵	Wu et al. (2023)	جریان هوا و تهویه حیاط	هندسه و ارتباط حیاط با محیط بیرون بر نرخ تعویض هوا اثر دارد.
۶	Ma et al. (2025)	عملکرد تهویه حیاط	شرایط جریان و ویژگی‌های هندسی بر رفتار تهویه‌ای اثرگذارند.
۷	Guedouh et al. (2025)	روشنایی طبیعی	افزایش ارتباط حیاط با آسمان می‌تواند نور مفید روز را افزایش دهد.
۸	Prakash et al. (2025)	عملکرد نوری حیاط	باز بودن بیشتر با بهبود دسترسی و توزیع نور طبیعی همراه است.
۹	Sun et al. (2025)	تابش و عملکرد نوری-حرارتی	افزایش دسترسی به آسمان می‌تواند دریافت تابش مستقیم را نیز افزایش دهد.
۱۰	Zamani et al. (2019)	مصالح و عملکرد حرارتی	ظرفیت حرارتی مصالح بر نوسانات و تأخیر حرارتی اثر دارد.
۱۱	Cho & Mohammadzadeh (2013)	عناصر طبیعی و حیاط	پوشش گیاهی و عناصر آبی می‌توانند شرایط حرارتی را تغییر دهند.
۱۲	Gomaa et al. (2024)	پوشش گیاهی و شرایط حرارتی	عناصر طبیعی از طریق فرآیندهای محیطی بر عملکرد حرارتی اثر می‌گذارند.

بر این اساس، خلاء پژوهش حاضر، نبود شواهد مقایسه‌ای کافی درباره اثر درجه محصوریت در شرایط کنترل‌شده و با ارزیابی هم‌زمان چند شاخص عملکردی است. پژوهش حاضر با مقایسه سه سناریوی حیاط مرکزی و ثابت نگه داشتن سایر شرایط، اثر تغییر محصوریت را بر آسایش حرارتی، تهویه طبیعی، روشنایی روز و عملکرد انرژی بررسی می‌کند.

مفاهیم نظری پژوهش

پژوهش حاضر بر این فرض تحلیلی استوار است که درجه محصوریت حیاط مرکزی به‌عنوان یک ویژگی هندسی، از طریق تغییر در میزان ارتباط حیاط با آسمان و محیط بیرون، بر چند سازوکار محیطی اثر می‌گذارد. این سازوکارها شامل دریافت تابش و سایه‌اندازی، تبادل هوا و تهویه طبیعی و دسترسی به نور طبیعی هستند که در نهایت می‌توانند شرایط حرارتی، آسایش، عملکرد نوری و بارهای انرژی ساختمان را تحت تأثیر قرار دهند. از این رو، چارچوب نظری پژوهش بر بررسی رابطه میان یک متغیر مستقل و مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی مرتبط است.

۱. درجه محصوریت و سازوکارهای محیطی

درجه محصوریت بیانگر میزان احاطه‌شدن فضای حیاط توسط توده و جداره‌های ساختمانی است. تغییر این ویژگی، سطح تماس حیاط با آسمان و محیط بیرون را دگرگون کرده و در نتیجه، میزان دریافت تابش، سایه‌اندازی و امکان جریان هوا را تغییر می‌دهد. محصوریت بیشتر می‌تواند دریافت تابش مستقیم و دید به آسمان را محدود کند، در حالی که کاهش محصوریت امکان ارتباط بیشتر با محیط بیرون و تبادل هوا را فراهم

می‌سازد (Diz-Mellado et al., 2023). بنابراین، تغییر محصوریت یک اثر منفرد ایجاد نمی‌کند، بلکه مجموعه سازوکارهای محیطی را به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر قرار می‌دهد.

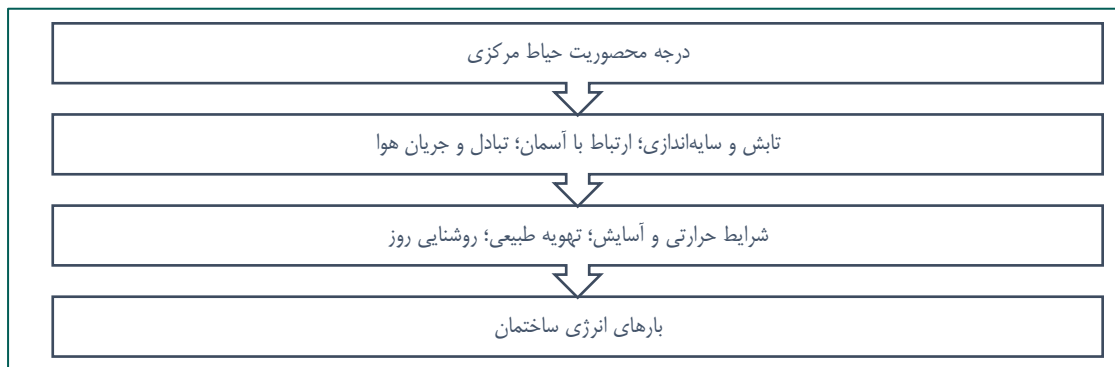
۲. محصوریت، عملکرد حرارتی و تهویه طبیعی

عملکرد حرارتی حیاط حاصل تعامل میان تابش، سایه‌اندازی، تبادل حرارتی و جریان هواست. تغییر درجه محصوریت می‌تواند از یک‌سو شرایط سایه و دریافت انرژی خورشیدی و از سوی دیگر مسیر و میزان تهویه طبیعی را تغییر دهد. با این حال، افزایش تهویه الزماً به کاهش محسوس دمای متوسط داخلی منجر نمی‌شود؛ زیرا پاسخ حرارتی ساختمان به ویژگی‌های پوسته، جرم حرارتی، تابش و شرایط بهره‌برداری نیز وابسته است. در نتیجه، ارزیابی اثر محصوریت باید با بررسی هم‌زمان تهویه طبیعی، شرایط حرارتی و شاخص‌های آسایش انجام شود (Aldawoud, 2008; Wu et al., 2023; Ma et al., 2025).

۳. محصوریت، روشنایی روز و عملکرد انرژی

میزان بازبودن حیاط و دسترسی آن به آسمان بر امکان ورود و توزیع نور طبیعی در فضاهای پیرامونی اثر می‌گذارد. کاهش محصوریت می‌تواند دسترسی به نور روز را افزایش دهد، اما هم‌زمان میزان مواجهه با تابش مستقیم را نیز تغییر دهد. از سوی دیگر، تغییر تابش، تهویه و شرایط روشنایی می‌تواند بارهای حرارتی و روشنایی مورد نیاز ساختمان را تأمین کند؛ بنابراین، عملکرد انرژی را نمی‌توان مستقل از پیامدهای حرارتی، تهویه و روشنایی تغییر مدیریت کرد. در این پایش، رابطه میان محصوریت و عملکرد انرژی حاصل برهم‌کنش چند عامل است و نباید به یک رابطه علی منفرد تقلیل یابد (Guedouh et al., 2025; Prakash et al., 2025; Sun et al., 2025).

در مجموع، چارچوب نظری پژوهش حاضر بر یک زنجیره تحلیلی استوار است: تغییر درجه محصوریت حیاط مرکزی سازوکارهای دریافت تابش و سایه‌اندازی، تبادل هوا و دسترسی به نور طبیعی را به‌طور تأثیر قرار می‌دهد؛ این سازوکارها متقابل بر شرایط حرارتی، آسایش، تهویه، روشنایی و عملکرد انرژی ساختمان اثر می‌گذارند. بر همین مبنا، پژوهش حاضر درجه محصوریت را به‌عنوان متغیر مستقل و شاخص‌های حرارتی، تهویه‌ای، نوری و انرژی را به‌عنوان ابعاد ارزیابی عملکرد در نظر می‌گیرد (تصویر ۱).



تصویر ۱. مدل مفهومی روابط میان درجه محصوریت حیاط مرکزی و شاخص‌های عملکرد ساختمان. تدوین: نگارندگان.

مدل مفهومی پژوهش نشان می‌دهد که درجه محصوریت حیاط مرکزی از طریق تغییر در دسترسی به آسمان، دریافت و کنترل تابش، سایه‌اندازی، تبادل هوا و ورود نور طبیعی، مجموعه‌ای از پیامدها را در عملکرد ساختمان ایجاد می‌کند. این پیامدها در قالب شاخص‌های روشنایی روز، تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و عملکرد انرژی قابل ارزیابی‌اند و برهم‌کنش میان آن‌ها باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، مدل ارائه‌شده مبنای تحلیلی پژوهش برای بررسی اثر تغییر درجه محصوریت بر عملکرد محیطی ساختمان و مقایسه سه سناریوی مورد مطالعه است.

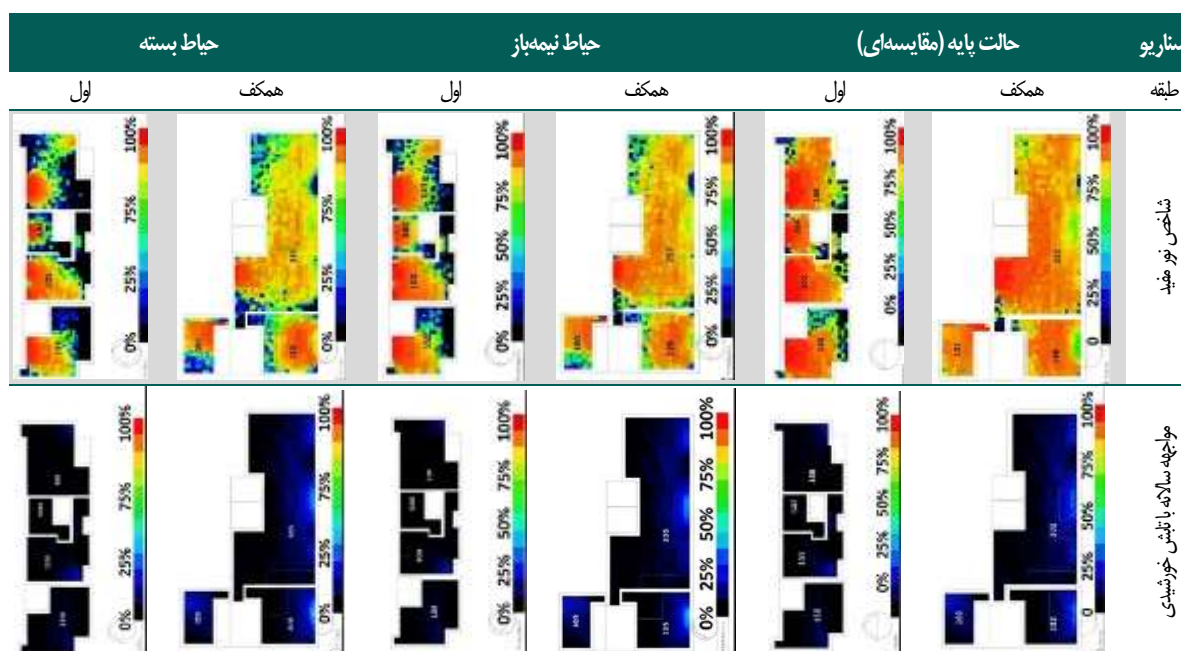
تحلیل مفاهیم

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی سه سناریوی حیاط مرکزی با درجات متفاوت محصوریت در شرایط کنترل شده ارائه می‌شود. تحلیل بر مقایسه شاخص‌های عملکردی شامل روشنایی روز، آسایش حرارتی، تهویه طبیعی و عملکرد انرژی متمرکز است. داده‌ها بر مبنای خروجی‌های ساعتی شبیه‌سازی و به صورت میانگین‌های ماهانه و سالانه بررسی شده‌اند.

۱. عملکرد نوری

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کاهش درجه محصوریت حیاط با افزایش نور مفید روز همراه است. مقدار شاخص نور مفید روز^{۳۸} از ۶۸۶۳ درصد در سناریوی حیاط بسته به ۹۲.۱۰ درصد در حالت پایه افزایش یافته که معادل حدود ۳۴ درصد رشد است. در مقابل، شاخص مواجهه سالانه با تابش خورشیدی^{۳۹} در سه سناریو تغییر محدودی داشته و در محدوده ۷۷.۴۱ تا ۷۸.۴۴ درصد باقی مانده است. جدول ۳ شاخص‌های نور مفید روز و مواجهه سالانه با تابش خورشیدی را در سه سناریو نشان داده است.

جدول ۳ مقایسه شاخص‌های نور مفید روز و مواجهه سالانه با تابش خورشیدی در سه سناریو؛ تدوین: نگارندگان.



مقایسه توزیع فضایی نشان می‌دهد که در سناریوی حالت پایه، بخش بیشتری از فضاهای داخلی در محدوده‌های بالاتر شاخص قرار دارد، در حالی که در سناریوی حیاط بسته سهم بیشتری از فضاها مقادیر پایین‌تر را نشان می‌دهند. بنابراین، تغییر محصوریت علاوه بر مقدار متوسط، الگوی توزیع فضایی نور روز را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۲. آسایش حرارتی

شاخص‌های ارزیابی آسایش حرارتی شامل شاخص پیش‌بینی میانگین رأی^{۴۰} و درصد ناراضایتی پیش‌بینی شده^{۴۱} تفاوت محسوسی میان سناریوها نشان می‌دهند. بر اساس نتایج جدول ۴، در فصل گرم مقدار شاخص پیش‌بینی میانگین رأی از ۱.۶۷ در سناریوی حیاط بسته به ۰.۴۷ در حالت پایه کاهش یافته و شاخص درصد ناراضایتی پیش‌بینی شده نیز از ۸۵.۹۸ درصد به ۴۸.۸۹ درصد رسیده است. بنابراین، سناریوی با محصوریت کمتر در فصل گرم شرایط به نسبت متعادل‌تری نشان می‌دهد، در حالی که در فصل سرد مقادیر شاخص‌ها در هر سه سناریو به محدوده خنثی نزدیک‌تر هستند.

جدول ۴. مقایسه شاخص‌های آسایش حرارتی در سه سناریو: تنوین؛ نگارندگان.

سناریو	فصل	دمای هوا (درجه سانتیگراد)	دمای تابشی (درجه سانتیگراد)	دمای عملیاتی (درجه سانتیگراد)	رطوبت نسبی (درصد)	شاخص پیش‌بینی میانگین رأی	شاخص درصد نارضایتی پیش‌بینی شده (درصد)
حیاط گرم	گرم	۲۸.۷	۲۹.۵	۲۹.۱	۲۲.۶	۱.۶۷	۸۵.۹۸
حیاط بسته سرد	سرد	۱۸.۹	۱۸.۷	۱۸.۸	۵۲.۱	۰.۹۷	۲۵.۴۳
حیاط گرم نیمه‌باز	گرم	۲۸.۳	۲۸.۶	۲۸.۵	۲۵.۲	۱.۲۲	۷۴.۱۶
حیاط نیمه‌باز سرد	سرد	۱۸.۴	۱۸.۲	۱۸.۳	۵۵.۳	۰.۳۳	۲۱.۴۶
حالت پایه گرم	گرم	۲۷.۱	۲۷.۴	۲۷.۲	۲۸.۶	۰.۴۷	۴۸.۸۹
حالت پایه سرد	سرد	۱۷.۹	۱۷.۸	۱۷.۸	۵۷.۰	۰.۱۸	۲۱.۵۵

بر اساس مقادیر مندرج در جدول ۴، الگوی کلی نشان می‌دهد که با کاهش درجه محصوریت، مقادیر شاخص‌های آسایش حرارتی در بخش قابل توجهی از دوره شبیه‌سازی به شرایط متعادل‌تری نزدیک می‌شوند. با توجه به اینکه این تغییرات با نوسانات دمای هوای داخلی^{۴۳}، دمای تشعشعی^{۴۴}، دمای عملیاتی^{۴۵} و رطوبت نسبی همراه است، بهبود آسایش حرارتی را نمی‌توان به تغییر یک متغیر منفرد نسبت داد.

۳. دمای داخلی و تهویه طبیعی

میانگین دمای داخلی در سه سناریو اختلاف محدودی دارد و بیشترین تفاوت آن کمتر از ۰.۸ درجه سانتی گراد گزارش شده است. در مقابل، نرخ تهویه طبیعی (بر حسب تعویض هوا بر ساعت) از ۰.۸۷ در سناریوی حیاط بسته به ۱.۳۱ در حالت پایه افزایش یافته که معادل حدود ۵۰ درصد افزایش است. جزییات و مؤلفه‌های نرخ تهویه طبیعی (تهویه خارجی^{۴۵}، نفوذ هوای خارجی^{۴۶} و تعویض هوا بر ساعت^{۴۷}) در سه سناریوی حیاط مرکزی در جدول ۵ مقایسه شده‌اند.

جدول ۵. مقایسه نرخ تهویه طبیعی و مؤلفه‌های آن در سه سناریوی حیاط مرکزی: تنوین؛ نگارندگان.

سناریو	تهویه خارجی (کیلووات ساعت)	نفوذ هوای خارجی (کیلووات ساعت)	تعویض هوا بر ساعت
حیاط بسته	۳۸.۶	۱,۹۳۰.۲	۰.۸۷
حیاط نیمه‌باز	۴۰.۷	۱,۳۴۰.۴	۰.۹۵
حالت پایه	۵۰.۴	۹۹۴.۶	۱.۳۱

تفاوت میان سناریوها در میزان تبادل هوا (همان‌طور که در جدول ۵ مشهود است) در حالی رخ داده که اختلاف میانگین دمای داخلی نسبتاً محدود باقی مانده است. این امر نشان می‌دهد که تغییر محصوریت در مدل مورد بررسی، بیش از آنکه صرفاً با تغییر دمای متوسط داخلی همراه باشد، با دگرگونی در الگوی تهویه و سایر شاخص‌های عملکرد حرارتی همراه شده است.

۴. عملکرد انرژی

مقایسه مصرف انرژی سالانه (کل انرژی سایت^{۴۸}، انرژی خالص سایت^{۴۹}، کل انرژی منبع^{۵۰} و انرژی خالص منبع^{۵۱}) در جدول ۶ ارائه شده است. مطابق نتایج جدول مصرف انرژی سالانه از ۱۱۱.۹۹ کیلووات ساعت بر مترمربع در سناریوی حیاط بسته به ۹۸.۱۳ کیلووات ساعت بر مترمربع در حالت پایه کاهش یافته است که معادل حدود ۱۲ درصد کاهش است. با توجه به عدم وجود سامانه تولید انرژی در محل واقع در مدل، مقادیر انرژی کل و خالص در هر دو سطح سایت و منبع یکسان گزارش شده‌اند.

جدول ۶ مقایسه مصرف انرژی سالانه بر حسب کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سه سناریوی حیاط مرکزی؛ تلون؛ نگارندگان.

سناریو	کل انرژی سایت	انرژی خالص سایت	کل انرژی منبع	انرژی خالص منبع
حیاط بسته	۱۱۱.۹۹	۱۱۱.۹۹	۳۱۳.۵۹	۳۱۳.۵۹
حیاط نیمه‌باز	۱۰۴.۱۶	۱۰۴.۱۶	۲۷۲.۷۰	۲۷۲.۷۰
حالت پایه	۹۸.۱۳	۹۸.۱۳	۱۹۲.۷۵	۱۹۲.۷۵

ارزیابی نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که تغییر درجه محصوریت با تفاوت در میزان انرژی سالانه موردنیاز ساختمان همراه است. با توجه به استفاده از مدل بارهای ایده‌آل، این مقادیر باید به‌عنوان خروجی عملکرد انرژی مدل و بارهای حرارتی موردنیاز برای تأمین شرایط تعریف‌شده تفسیر شوند، نه به‌عنوان مصرف واقعی تجهیزات مکانیکی.

۵. مقایسه کلی عملکرد سناریوها

به‌منظور جمع‌بندی نتایج، مهم‌ترین شاخص‌های عملکردی سه سناریو شامل نور مفید روز، آسایش حرارتی، دمای داخلی، تهویه طبیعی و عملکرد انرژی در جدول ۷ به‌صورت هم‌زمان مقایسه شده‌اند.

جدول ۷. مقایسه شاخص‌های عملکردی برای سه سناریوی حیاط مرکزی (میانگین سالانه). تلون؛ نگارندگان

شاخص‌ها	نور مفید روز (درصد)	مواجهه سالانه با تابش خورشیدی (درصد)	میانگین دمای داخلی (درجه سانتیگراد)	شاخص پیش‌بینی میانگین رأی	شاخص درصد نارضایتی پیش‌بینی شده (درصد)	نرخ تهویه طبیعی (تعویض هوا بر ساعت)	میزان کل انرژی مصرفی (کیلووات‌ساعت بر مترمربع)
حیاط بسته	۶۸.۶۳	۷۸.۴۴	۲۳.۹۴	+۱.۶۷	۶۹.۲۸	۰.۸۷	۱۱۱.۹۹
حیاط نیمه‌باز	۸۲.۷۱	۷۸.۱۸	۲۳.۳۹	+۰.۹۰	۴۱.۰۲	۰.۹۵	۱۰۴.۱۶
حالت پایه	۹۲.۱۰	۷۷.۴۱	۲۳.۱۵	+۰.۰۸	۱۴.۹۱	۱.۳۱	۹۸.۱۳

ارزیابی داده‌های جدول ۷ نشان می‌دهد که کاهش درجه محصوریت با افزایش نور مفید روز، افزایش نرخ تهویه طبیعی، بهبود شاخص‌های آسایش حرارتی (پیش‌بینی میانگین رأی و درصد نارضایتی پیش‌بینی شده) و کاهش انرژی سالانه همراه است؛ در حالی که میانگین دمای داخلی تغییر محدودی دارد. بیشترین تفاوت میان سناریوها در شاخص‌های نور مفید روز، تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و عملکرد انرژی مشاهده می‌شود. بنابراین، تغییر درجه محصوریت بر شاخص‌های عملکردی اثر یکسانی ندارد و ارزیابی آن نیازمند توجه هم‌زمان به چند بعد عملکردی است.

تفسیر، تبیین و بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر درجه محصوریت حیاط مرکزی در شرایط مدل شده با تغییر هم‌زمان چند شاخص عملکرد محیطی همراه است. در مقایسه سه سناریوی حیاط بسته، نیمه‌باز و با کمترین درجه محصوریت، بیشترین تفاوت در شاخص‌های نور مفید روز، نرخ تهویه طبیعی، آسایش حرارتی (پیش‌بینی میانگین رأی و درصد نارضایتی پیش‌بینی شده) و مصرف انرژی مشاهده شد، در حالی که میانگین دمای داخلی تغییر محدودی داشت. بنابراین، اثر محصوریت را نمی‌توان با یک شاخص منفرد تبیین کرد و بررسی هم‌زمان ابعاد حرارتی، نوری، تهویه‌ای و انرژی ضروری است.

تبیین عملکرد حرارتی و تهویه طبیعی

کاهش درجه محصوریت از حیاط بسته به سناریوی با کمترین محصوریت، نرخ تعویض هوا را از ۰.۸۷ به ۱.۳۱ افزایش داده است. بر اساس میانگین سالانه شاخص‌های آسایش حرارتی (جدول ۷)، این تغییر همزمان با کاهش شاخص پیش‌بینی میانگین رأی از ۱.۶۷+ به ۰.۰۸+ و کاهش درصد نارضایتی پیش‌بینی شده از ۶۹.۲۸ به ۱۴.۹۱ درصد رخ داده است. همزمانی این تغییرات نشان می‌دهد که افزایش تبادل هوا می‌تواند یکی از عوامل مرتبط با بهبود شرایط آسایش حرارتی در سناریوهای با محصوریت کمتر باشد. این نتیجه با مطالعاتی که نقش هندسه حیاط، بازشوها و مسیرهای جریان هوا را در عملکرد تهویه طبیعی برجسته کرده‌اند، همراستا است (Wu et al., 2023; Ma et al., 2025). با این حال، این رابطه را نمی‌توان به صورت علی و مستقل به نرخ تعویض هوا نسبت داد. میانگین دمای داخلی در سه سناریو حداکثر ۰.۷۹ درجه سانتی‌گراد تغییر کرده است، در حالی که شاخص‌های آسایش حرارتی تغییرات بسیار بیشتری داشته‌اند. از آنجا که شاخص‌های آسایش علاوه بر دمای هوا به عواملی مانند دمای تشعشعی میانگین، سرعت هوا، رطوبت و شرایط فیزیولوژیکی کاربران وابسته اند (ASHRAE Standard 55, 2023; ISO 7730, 2005)، تفاوت مشاهده‌شده احتمالاً حاصل برهم‌کنش چند متغیر محیطی است. با توجه به اینکه سهم مستقل هر عامل در این پژوهش تفکیک نشده است، این یافته باید به‌عنوان همراهی میان تغییر محصوریت، تهویه و شاخص‌های آسایش تفسیر شود، نه اثبات اثر مستقل نرخ تعویض هوا.

نتایج حاضر همچنین با بخشی از مطالعات معماری سنتی مناطق گرم و خشک که بر مزایای حیاط‌های محصور در ایجاد سایه و کاهش دریافت تابش مستقیم تأکید دارند، متفاوت است (Aldawoud, 2008; Tabadkani et al., 2022; Aryani et al., 2018). این تفاوت الزاماً به معنای رد مزایای حیاط‌های محصور نیست؛ بلکه می‌تواند ناشی از تفاوت در دامنه هندسی، شرایط اقلیمی، راهبردهای بهره‌برداری و شاخص‌های ارزیابی باشد. مزیت رویکرد حاضر آن است که با ثابت نگه داشتن سایر متغیرهای اصلی، امکان مشاهده اثر تغییر درجه محصوریت در یک چارچوب مقایسه‌ای کنترل شده فراهم شده است.

تبیین عملکرد روشنایی روز

در حوزه روشنایی، کاهش محصوریت با افزایش نور مفید روز از ۶۸۶۳ به ۹۲.۱۰ درصد همراه بوده است. این نتیجه با مطالعاتی که ارتباط میان هندسه حیاط، دسترسی بیشتر به آسمان و بهبود عملکرد نور روز را گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد (Guedouh et al., 2025; Prakash et al., 2025). افزایش دسترسی به آسمان در سناریوهای بازتر، امکان دریافت بیشتر نور طبیعی و توزیع آن در فضاهای داخلی را فراهم می‌کند و با الگوی مشاهده‌شده در نتایج شبیه‌سازی سازگار است.

در مقابل، شاخص مواجهه سالانه با تابش خورشیدی در محدوده نسبتاً ثابتی حدود ۷۷ تا ۷۸ درصد باقی مانده است. بنابراین، در دامنه سناریوهای بررسی‌شده، افزایش نور مفید روز با افزایش متناظر و قابل توجه خیرگی همراه نبوده است. این نتیجه با توجه به اهمیت همزمان کیفیت و کمیت نور روز نشان می‌دهد که ارزیابی عملکرد نوری بر اساس یک شاخص منفرد می‌تواند ناقص باشد. همچنین در اقلیم گرم و خشک، افزایش دسترسی به نور طبیعی باید همزمان با پیامدهای احتمالی افزایش دریافت تابش خورشیدی بررسی شود (Sun et al., 2025).

تبیین عملکرد انرژی

مصرف انرژی سالانه از ۱۱۱.۹۹ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در حیاط بسته به ۱۰۴.۱۶ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سناریوی نیمه‌باز و ۹۸.۱۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سناریوی با کمترین محصوریت کاهش یافته است. این روند همزمان با افزایش نرخ تعویض هوا و بهبود شاخص‌های آسایش حرارتی مشاهده شده است. با این حال، به دلیل ماهیت مقایسه‌ای پژوهش و عدم تفکیک سهم مستقل عوامل مؤثر، نمی‌توان کاهش انرژی را صرفاً به افزایش تهویه طبیعی یا یک سازوکار منفرد نسبت داد.

این یافته اهمیت رویکرد چندشاخصه را در ارزیابی حیاط مرکزی نشان می‌دهد؛ زیرا تغییر محصوریت همزمان بر تابش، جریان هوا، روشنایی و شرایط حرارتی اثر می‌گذارد و پیامدهایی آن در مصرف انرژی، حاصل برهم‌کنش این عوامل است. همچنین با توجه به استفاده از مدل سیستم هوای بار ایده‌آل در شبیه‌سازی (که نیاز حرارتی و برودتی خالص محیط را بدون اعمال راندمان تجهیزات واقعی محاسبه می‌کند)، مقادیر

گزارش شده بیانگر بارهای حرارتی مورد نیاز و عملکرد انرژی مدل تحت شرایط تعریف شده هستند. بنابراین، این مقادیر نباید مستقیماً معادل مصرف واقعی انرژی سامانه‌های تأسیساتی در ساختمان بهره‌برداری شده تلقی شوند.

پیامدهای طراحی و حدود تعمیم نتایج

از منظر طراحی، نتایج نشان می‌دهد که درجه محصوریت می‌تواند به عنوان یک متغیر قابل تنظیم در طراحی حیاط مرکزی مورد توجه قرار گیرد. در محدوده سناریوهای این پژوهش، حرکت از حیاط بسته به نیمه‌باز و سپس به سناریوی با کمترین محصوریت، با بهبود هم‌زمان نور مفید روز و نرخ تهویه طبیعی، کاهش شاخص‌های آسایش و کاهش انرژی سالانه همراه بوده است. با این حال، این یافته به معنای برتری مطلق یا نامحدود کاهش محصوریت نیست؛ زیرا پژوهش حاضر تنها سه سطح محصوریت را بررسی کرده و هدف آن تعیین حد بهینه محصوریت نبوده است.

همچنین، نتایج باید در چارچوب هندسه، شرایط اقلیمی، مصالح و الگوی بهره‌برداری تعریف شده در مدل تفسیر شوند. عواملی مانند رفتار واقعی کاربران، نحوه باز و بسته شدن پنجره‌ها و حضور پوشش گیاهی می‌توانند در شرایط واقعی بر عملکرد حیاط اثرگذار باشند و در این پژوهش به صورت ساده‌سازی شده یا کنترل شده در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین، تعمیم نتایج به سایر فرم‌ها و شرایط اقلیمی نیازمند بررسی‌های بیشتر است. به منظور ساماندهی و انسجام بخشی به یافته‌های فوق و تبیین دقیق‌تر جایگاه این پژوهش در بستر ادبیات موجود، جدول ۸ به مقایسه تطبیقی ابعاد مختلف عملکردی، دستاوردهای کمی این مطالعه و میزان هم‌راستایی آن‌ها با مطالعات پیشین پرداخته است.

جدول ۸. مدل مفهومی رولپت میان درجه محصوریت حیاط مرکزی و شاخص‌های عملکرد ساختمان. تلون: نگارندگان.

بعد عملکردی	یافته کمی و کلیدی پژوهش حاضر	هم‌راستایی با ادبیات پیشین	منابع و مطالعات مرجع
تهویه طبیعی و حرارت	افزایش نرخ تعویض هوا (تا ۱۳۱ مرتبه بر ساعت) و بهبود شاخص‌های آسایش حرارتی (کاهش درصد نارضایتی و شاخص پیش‌بینی رأی)	هم‌راستا با مطالعات تأثیر هندسه بازشوها بر جریان هوا	Wu et al., 2023; Ma et al., 2025
سایه و شرایط تابشی	بهبود آسایش در سناریوی کم‌محصور بر خلاف فرض سستی برتری مطلق حیاط‌های بسته	متفاوت از رویکرد سستی مناطق گرم و خشک (قابل توجه با تفاوت دامنه هندسی و راهبردهای حرارتی)	Aldawoud, 2008; Tabadkani et al., 2022; Aryani et al., 2018
عملکرد نوری روز	افزایش چشمگیر نور مفید روز (تا ۹۲۱۰ درصد) بدون افزایش معادل در شاخص مواجهه سالانه با تابش خورشیدی	هم‌راستا با مطالعات ارتباط هندسه حیاط و دسترسی به آسمان	Guedouh et al., 2025; Prakash et al., 2025
عملکرد انرژی	کاهش مصرف کل انرژی سالانه (تا ۹۸۱۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع) هم‌زمان با بهبود تهویه و نور	تبیین کننده ضرورت رویکرد چندشاخصه در ارزیابی هم‌زمان انرژی، تهویه و روشنایی	پژوهش حاضر و مدل شبیه‌سازی کنترل شده

همان گونه که داده‌های مندرج در جدول ۸ نشان می‌دهد، سهم اصلی پژوهش حاضر ارائه شواهد کمی و کنترل شده از ارتباط چندبعدی درجه محصوریت حیاط مرکزی با شاخص‌های عملکرد محیطی است. یافته‌ها تأیید می‌کند که در دامنه سناریوهای بررسی شده، کاهش محصوریت به طور هم‌زمان به ارتقای نور مفید روز، بهبود تهویه طبیعی، تعدیل شاخص‌های آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی منجر می‌شود. در حالی که میانگین دمای داخلی تغییر محدودی دارد. بر این اساس، درجه محصوریت به عنوان یک ابزار و متغیر مؤثر در طراحی عملکردمحور حیاط مرکزی قابل اعمال است؛ با این حال، تعمیم نتایج و تعیین حد بهینه آن مستلزم بررسی طیف وسیع‌تری از سطوح محصوریت و تحلیل هم‌زمان الزامات فضایی، اقلیمی و عملکردی خواهد بود.

در مجموع، یافته پژوهش حاضر را باید به عنوان شناسایی جهت تغییر عملکرد در دامنه سه سناریوی بررسی شده، و نه تعیین نقطه بهینه طراحی، تفسیر کرد.

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی اثر تغییر درجه محصوریت حیاط مرکزی بر عملکرد محیطی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم گرم و خشک انجام شد. سه سناریوی حیاط بسته، نیمه‌باز و کمترین محصوریت، با ثابت نگه‌داشتن شرایط هندسی، مصالح، بهره‌برداری و اقلیمی، شبیه‌سازی و بر اساس شاخص‌های روشنایی روز، تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و انرژی مقایسه شدند.

نتایج نشان داد که کاهش درجه محصوریت در محدوده بررسی شده با افزایش نرخ تهویه طبیعی از ۰٫۸۷ به ۱٫۳۱ مرتبه بر ساعت و نور مفید روز از ۶۸٫۶۳ به ۹۲٫۱۰ درصد، بهبود شاخص‌های آسایش حرارتی و کاهش انرژی شبیه‌سازی شده از ۱۱۱٫۹۹ به ۹۸٫۱۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع همراه است. در مقابل، میانگین دمای داخلی تغییر محدودی داشت. در مجموع، سناریوی کمترین محصوریت در میان سه حالت، بهترین عملکرد ترکیبی را در شاخص‌های مورد بررسی نشان داد. از این رو، در محدوده هندسی و شرایط شبیه‌سازی این پژوهش، کمترین درجه محصوریت آزمون شده را می‌توان به عنوان حد عملکردی مطلوب در دامنه مطالعه در نظر گرفت؛ هرچند تعیین یک حد بهینه عمومی نیازمند بررسی سطوح میانی و شرایط متفاوت است.

با وجود عملکرد بهتر سناریوی کم‌محصور، این یافته به معنای برتری عمومی حیاط‌های باز یا نفی نقش محصوریت در معماری اقلیم گرم و خشک نیست. محصوریت در معماری سستی از طریق ایجاد سایه، کنترل تابش و شکل‌دهی به خرداقلیم نقش مهمی دارد و تفاوت نتایج حاضر با برخی مطالعات پیشین باید در چارچوب هندسه، اقلیم و فرضیات مدل تفسیر شود. همچنین، ساده‌سازی یا حذف عواملی مانند پوشش گیاهی، عناصر آبی و رفتار تطبیقی کاربران، تعمیم نتایج و استنتاج روابط علی را محدود می‌کند. مدل تفسیری پژوهش در تصویر ۲، روابط میان درجه محصوریت و پیامدهای عملکردی را خلاصه می‌کند.



تصویر ۲. مدل تفسیری و نتیجه‌گیری پژوهش: رابطه درجه محصوریت حیاط مرکزی با شاخص‌های عملکرد محیطی ساختمان؛ تلویح: نگارندگان.

با توجه به مدل تصویر ۲، تغییر درجه محصوریت از طریق تغییر دسترسی به آسمان و شرایط جریان هوا، با تغییر در روشنایی روز، تهویه و آسایش حرارتی و در پی آن عملکرد انرژی همراه است. سناریوی کم‌محصور صرفاً به عنوان سطح مرجع مقایسه‌ای در این پژوهش در نظر گرفته شده و توصیه‌ای برای حذف حیاط مرکزی نیست. بنابراین، حد عملکردی مطلوب شناسایی شده در این مطالعه، صرفاً به دامنه سناریوهای آزمون شده محدود است و تعیین حد بهینه عمومی محصوریت، به بررسی سطوح بیشتر و شرایط متنوع‌تر نیاز دارد.

دستآورد پژوهش

دستآورد اصلی پژوهش، نشان دادن درجه محصوریت به عنوان یک متغیر قابل تنظیم در عملکرد چندشاخصه حیاط مرکزی است. یافته‌ها نشان داد که در دامنه بررسی شده، کاهش محصوریت تا کمترین سطح آزمون شده، همزمان با بهبود نور مفید روز، تهویه طبیعی و آسایش حرارتی و کاهش انرژی شبیه‌سازی شده همراه است، در حالی که میانگین دمای داخلی تغییر محدودی دارد. بنابراین، ارزش اصلی پژوهش در ارزیابی همزمان پیامدهای تغییر محصوریت در حوزه‌های روشنایی، تهویه، آسایش حرارتی و انرژی و ارائه مبنایی برای تنظیم درجه محصوریت در مرحله طراحی اولیه است. با این حال، تعمیم این یافته‌ها به سایر شرایط نیازمند بررسی سطوح میانی محصوریت، ویژگی‌های متفاوت اقلیمی و هندسی و عواملی مانند پوشش گیاهی، عناصر آبی و رفتار تطبیقی کاربران است.

ملاحظات اخلاقی و اطلاعات تکمیلی

برگرفته از پایان نامه/رساله: «وبسندگان اعلام می‌دارند که این مقاله حاصل پژوهش مستقل بوده و مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد یا رساله دکتری نیست»

حمایت مالی: «این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است»

تعارض منافع: «وبسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع شخصی، مالی یا حرفه‌ای در رابطه با پژوهش حاضر و انتشار این مقاله ندارند»

استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی: «وبسندگان اعلام می‌دارند در این پژوهش از هیچ‌گونه ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است».

پی‌نوشت

1. Passive Element
2. Daylight
3. Thermal Comfort
4. Energy Consumption
5. Enclosure Degree
6. Airflow
7. Numerical Analyses
8. Natural Ventilation
9. Numerical Simulation
10. Design Builder
11. Energy Plus
12. Heat Transfer Coefficient (U-value)
13. Specific Heat Capacity
14. Density
15. Dry-Bulb Temperature
16. Relative Humidity
17. Solar Radiation
18. Wind Speed
19. Typical Meteorological Year (TMY)
20. Occupancy
21. Internal Loads
22. Equipment and Lighting
23. Infiltration Rate
24. Setpoint Temperature
25. Heating and Cooling Loads
26. Ideal Loads Air System
27. Natural Ventilation Rate
28. Multizone Airflow
29. Pressure Difference
30. Stack Effect
31. Glare
32. Standard Sky Models
33. Height-to-Width Ratio
34. Courtyard Depth
35. Sky View Factor (SVF)
36. Temperature Fluctuations
37. Useful Daylight Illuminance (UDI)
38. Spatial Daylight Distribution (SDD)
39. Annual Sunlight Exposure (ASE)
40. Predicted Mean Vote (PMV)
41. Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)
42. Indoor Air Temperature
43. Mean Radiant Temperature
44. Operative Temperature
45. Outdoor Ventilation / External Ventilation
46. Infiltration / External Air Infiltration
47. Air Changes per Hour (ACH)
48. Total Site Energy
49. Net Site Energy
50. Total Source Energy
51. Net Source Energy

منابع

- Aldawoud, A., & Clark, R. (2008). Comparative analysis of energy performance between courtyard and atrium in buildings. *Energy and Buildings*, 40(3), 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.017>
- Aryani, S. M., Sasongko, S., Sulistyono, B., & Hidayati, N. (2018). Courtyard placement for maintaining air movement of natural ventilation inside a transformed house. *Proceedings of the 4th Bandung Creative Movement International Conference on Creative Industries 2017*. <https://doi.org/10.2991/bcm-17.2018.70>
- ASHRAE. (2023). *Thermal environmental conditions for human occupancy (ANSI/ASHRAE Standard 55-2020/2023)*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Cho, S., & Mohammadzadeh, N. (2013). Thermal comfort analysis of a traditional Iranian courtyard for the design of sustainable residential buildings. In *Proceedings of Building Simulation 2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association* (pp. 2326–2333). IBPSA. https://www.aivc.org/sites/default/files/p_2377.pdf
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus: 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., Ruiz-Pardo, Á., Rivera-Gómez, C., Galán-Marín, C., & Sanchez de la Flor, F. J. (2023). Unravelling the impact of courtyard geometry on cooling energy consumption in buildings. *Building and Environment*, 237, 110349. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110349>
- Gomaa, M. M., Othman, E., Mohamed, A. F., & Ragab, A. (2024). Quantifying the impacts of courtyard vegetation on thermal and energy performance of university buildings in hot arid regions. *Urban Science*, 8(3), 136. <https://doi.org/10.3390/urbansci8030136>
- Guedouh, M. S., Khadraoui, M. A., & Belmahdi, H. S. (2025). Optimization of the courtyard building form to enhance the thermo-luminous performances using numerical simulation models. *South Florida Journal of Development*, 6(4), e5200. <https://doi.org/10.46932/sfjdv6n4-053>
- Gunasekaran, R., & Priya, R. S. (2025). Simulating the thermal efficiency of courtyard houses: New architectural insights from the warm and humid climate of Tiruchirappalli City, India. *Architecture*, 5(2), 21. <https://doi.org/10.3390/architecture5020021>
- ISO. (2005). *Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO Standard No. 7730:2005)*. International Organization for Standardization.
- Ma, S., Mahdzar, S. S. S., Tukiman, N. I., & Leng, P. C. (2025). Optimization of natural ventilation in courtyard-style residential buildings: Insights from Inner Mongolian design principles. *Journal of Chinese Architecture and Urbanism*, 7(3), 7226. <https://doi.org/10.36922/jcau.7226>
- Prakash, D., Rajamohan, G., Jeevanandh, N. R., Sibi, A., & Achal Dev, K. N. (2025). Ventilation analysis in a traditional courtyard building with wind catching roof. *Journal of Engineering and Applied Science*, 72, 185. <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00745-2>
- Soflaei, F., Shokouhian, M., & Shemirani, S. M. (2016a). Traditional Iranian courtyards as microclimate modifiers by considering orientation, dimensions, and proportions. *Frontiers of Architectural Research*, 5(1), 225–238. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.02.002>

- Soflaei, F., Shokouhian, M., & Shemirani, S. M. M. (2016b). 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.ijsbe.2015.12.001>
- Sun, H., Bensalem, R., Dik, A., Tao, Z., Wang, Z., Jimenez-Bescos, C., & Calautit, J. K. (2025). The impact of courtyard roof shape on adjacent building natural ventilation and passive cooling. *Journal of Building Engineering*, 113, 113331. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113331>
- 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), 881–897. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.02.006>
- Wu, R., Fang, X., Brown, R., Liu, S., & Zhao, H. (2023). Establishing a link between complex courtyard spaces and thermal comfort. *Building and Environment*, 245, 110852. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110852>
- Zamani, Z., Heidari, S., Azmoodeh, M., & Taleghani, M. (2019). Energy performance and summer thermal comfort of traditional courtyard buildings in a desert climate. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(6), e13256. <https://doi.org/10.1002/ep.13256>