Karafan
Quarterly Scientific Journal of National University of Skill
Winter 2026, Vol. 22, No. 4, p. 300-319
Journal Homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
doi:10.48301/kssa.2025.520807.3211

Evaluation of the effect of integration of green walls and natural ventilation in optimizing the energy consumption of residential spaces in temperate and humid climates

Bahareh Marzban[1], Shahin Heidari[2*], Raheleh Rostami[3]

[1]PhD Student, Department of Architecture, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran.
[2]professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture, University of Tehran, Tehran, Iran.
[3]Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 09.05.2025
Revised: 02.10.2025
Accepted: 10.11.2025

Keyword:
Atrium
green wall
natural ventilation
energy consumption
design builder

***Corresponding Author:**
Shahin Heidari
Email: *shheidari@ut.ac.ir*

ABSTRACT

Design, as an advanced system, plays an important role in energy waste in the world. The purpose of this study is to evaluate the effect of an interior green living wall and natural ventilation in the atrium space to reduce energy consumption in a temperate and humid climate. One of the innovative aspects of this research is the focus on the simultaneous analysis of these two variables and showing their synergistic effects on optimizing energy consumption, which in previous studies have been studied independently. The method of this research is descriptive-analytical and simulation. Six building samples in the temperate and humid climate of Mazandaran province were selected, which were first simulated without natural ventilation and green walls on the interior walls of the atrium in the Design Builder software and then examined with them. Simulation results using DesignBuilder software show that the greatest reduction in energy consumption is in building number one in Babol city, which, when using a combined system, has a 54.6 percent reduction in energy consumption in the heating sector and a 24.7 percent reduction in energy consumption in the cooling sector, and carbon dioxide production is also reduced by 31.8 percent. Also, the results of the paired t-test statistical analysis show that the combined system has a significant effect on reducing the total energy consumption of the building and reducing consumption in the cooling sector, but it has no significant effect on heating consumption.

©2025 the authors. Published by National University of Skill, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Design as an advanced system plays an important role in energy waste in the world. The purpose of this study is to evaluate the effect of an interior green living wall and natural ventilation in the atrium space to reduce energy consumption in a temperate and humid climate. One of the innovative aspects of this research is the focus on the simultaneous analysis of these two variables and showing their synergistic effects on optimizing energy consumption, which in previous studies have been studied independently. The method of this research is descriptive-analytical and simulation. Six building samples in the temperate and humid climate of Mazandaran province were selected, which were first simulated without natural ventilation and a green wall on the interior walls of the atrium in the DesignBuilder software and then examined with them. The simulation results show that the greatest reduction in energy consumption is in building number one, in the city of Babol. Also, the results of the paired t-test statistical analysis show that the aforementioned combined system has a significant effect on reducing the building's total energy consumption and reducing consumption in the cooling sector, but it does not have a significant effect on heating consumption.

Methodology

The research method in this study is descriptive-analytical and simulation. The method of collecting information is documentary and the required data are extracted from reliable scientific sources, climatic references, field surveys and architectural maps. In this study, the independent variables include (natural ventilation - green wall on the inner walls of the atrium - building elevation and climatic conditions) and the dependent variable includes (carbon dioxide - cooling and heating load and energy consumption). In this study, six residential apartment samples in Mazandaran province have been selected. First, the buildings under study without natural ventilation and green wall on the inner walls of the atrium have been simulated and evaluated in the thermal behavior simulation software Design Builder. In the next stage, natural ventilation and green wall on the atrium wall are added and the results are analyzed and compared in terms of energy. Also, in this study, a paired t-test was performed for statistical analysis using the programming language (Python) and the library (SciPy) version 3.x.

Results and Discussion

The results of these simulations show that the highest reduction in energy consumption was observed in Building No. 1 in Babol. The results also show that the use of a green wall and natural ventilation in the atrium of this building has reduced gas consumption by 54.6% in the heating section and electricity consumption by 24.7% in the cooling section. In total, the reduction in total energy consumption by separating energy carriers is estimated at 41.7%. In addition, the amount of carbon dioxide emissions in this building has been

reduced by 31.8% by adding a green wall and natural ventilation to the atrium. In Building No. 2, an 8.7% reduction in energy consumption is observed in the heating section when using a green wall and natural ventilation. In the cooling section, there is also an 18.7% reduction in energy consumption when using a green wall and natural ventilation. In Building No. 3, a 14.7% reduction in energy consumption is observed in the heating section when using a green wall and natural ventilation. In the cooling section, there is a 7% reduction in energy consumption when using a green wall and natural ventilation. In building number 4, there is a 16% reduction in energy consumption when using a green wall and natural ventilation in the heating section. There is a 5% reduction in energy consumption when using a green wall and natural ventilation in the cooling section. In building number 5, there is a 5% increase in energy consumption when using a green wall and natural ventilation in the heating section. There is a 10% reduction in energy consumption when using a green wall and natural ventilation in the cooling section. In building number 6, there is a 12% increase in energy consumption when using a green wall and natural ventilation in the heating section.

Only in building number 6, the effectiveness of the combined system solution was noticeably different and in some cases an increase in gas consumption was observed. This heterogeneity could be due to specific architectural design factors such as the unfavorable northern orientation of the building, which, together with the strong influence of environmental factors such as wind direction in winter, has led to a greater dependence on heating in the building. Another important factor is that the atrium area of this building (17.45 square meters) is larger than that of other sample buildings, which causes more heat loss during natural ventilation of the atrium in winter and obviously increases gas consumption in the heating section.

Conclusions

The results of the simulations show that among the buildings studied, the greatest reduction in energy consumption was observed in building number 1 in Babol city. The results of the paired t-test statistical analysis show that the green wall and natural ventilation of the atrium have effectively reduced the total energy consumption of the building and also reduced consumption in the cooling and electricity sectors and have had a significant effect, but have not had a significant effect on heating consumption. The reasons for this are, in short, due to specific architectural design factors such as the northern orientation of the building, which, with the strong influence of environmental factors such as wind direction in winter, has caused greater dependence on heating in the building. Also, the atrium area of this building is larger than other sample buildings, which causes more heat loss during natural ventilation of the atrium in winter.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه ملی مهارت
زمستان ۱۴۰۴، دوره ۲۲، شماره ۴، ۳۱۹-۳۰۰
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi: 10.48301/kssa.2025.520807.3211

ارزیابی تأثیر یکپارچه‌سازی دیوارهای سبز و تهویه طبیعی در بهینه‌سازی مصرف انرژی فضاهای مسکونی در اقلیم‌های معتدل و مرطوب

بهاره مرزبان[۱]، شاهین حیدری[۲*]، راحله رستمی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران.
۲- استاد، گروه معماری، دانشکده معماری، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳- استادیار، گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۹
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۱۰
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

کلید واژگان:
آتریوم
دیوار سبز
تهویه طبیعی
مصرف انرژی
دیزاین بیلدر

***نویسنده مسئول:** شاهین حیدری
پست الکترونیکی:
shheidari@ut.ac.ir

چکیده

طراحی به‌عنوان یک سیستم پیشرفته، نقش مهمی در هدررفت انرژی در جهان دارد. هدف از این مطالعه، ارزیابی تأثیر دیوار زنده سبز داخلی و تهویه طبیعی در فضای آتریوم جهت کاهش مصرف انرژی در اقلیم معتدل و مرطوب است. یکی از جنبه‌های نوآورانه این تحقیق، تمرکز بر تحلیل هم‌زمان این دو متغیر و نشان‌دادن تأثیرات هم‌افزای آن بر بهینه‌سازی مصرف انرژی است که در پژوهش‌های پیشین، این عوامل به‌صورت مستقل مطالعه شده‌اند. روش این تحقیق، توصیفی - تحلیلی و شبیه‌سازی است. شش نمونه ساختمان در اقلیم معتدل و مرطوب استان مازندران انتخاب شده که ابتدا بدون تهویه طبیعی و دیوار سبز بر روی جداره‌های داخلی آتریوم در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر شبیه‌سازی شده و سپس باوجود آن‌ها بررسی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر نشان می‌دهد که بیشترین کاهش مصرف انرژی در ساختمان شماره یک، در شهر بابل است که در حالت استفاده از سیستم ترکیبی، در بخش گرمایش ۵۴٫۶ درصد کاهش مصرف انرژی و در بخش سرمایش ۲۴٫۷درصد کاهش مصرف انرژی دارد و تولید دی‌اکسیدکربن نیز به میزان ۳۱٫۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از تحلیل آماری آزمون t-test زوجی نیز نشان می‌دهد که سیستم ترکیبی مذکور دارای تأثیر معناداری در کاهش مصرف کل انرژی ساختمان و کاهش مصرف در بخش سرمایش است، ولی تأثیر معناداری بر مصرف گرمایش نداشته است.

شاپای الکترونیکی: ۴۴۳۰-۲۵۳۸
شاپای چاپی: ۹۷۹۶-۲۳۸۲

©2025 the authors. Published by National University of Skill, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

انرژی به‌عنوان یکی از ارکان اساسی زندگی مدرن، نقشی بی‌بدیل در توسعه اجتماعی و اقتصادی جوامع بخصوص در بخش ساختمان‌های مسکونی ایفا می‌کند [۱]. مصرف بی‌رویه انرژی‌های تجدیدناپذیر، بحران‌های زیست‌محیطی مانند آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی را تشدید کرده است. ازاین‌رو، طراحی معماری که مبتنی بر همزیستی با شرایط طبیعی و کاهش اتلاف انرژی باشد، به یک ضرورت انکارناپذیر تبدیل شده است[۲]. همچنین تغییر نگرش به سمت توسعه پایدار و استفاده از فناوری‌های انرژی پاک و پربازده، اولویت جهانی است[۳] و [۴]. یکی از راهکارهای نوین و مؤثر در این حوزه، استفاده از آتریوم‌ها (نورگیرهای داخلی) در ساختمان های مسکونی است. این فضاها با تأمین و تسهیل جریان هوای تازه، به کاهش گرمای داخلی، بهبود کیفیت محیط و افزایش سلامت و راحتی ساکنان کمک می‌کنند[۵]. از دیگر راهکارهای مؤثر استفاده از دیوارهای سبز است. این دیوارها مزایای گسترده زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی دارند [۶] و موجب کاهش مصرف انرژی، کاهش دمای سطوح ساختمان نسبت به محیط، ایجاد عایق حرارتی، کاهش سرمای باد، محافظت از پوسته ساختمان، مزایای زیبایی‌شناختی، تأمین زیستگاه و افزایش تنوع زیستی می‌گردد[۷]. تحقیقات نشان می‌دهد ترکیب موثر آتریوم‌ها با دیوارهای سبز، تأثیر چشمگیری در کاهش مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی دارد و به‌عنوان رویکردی نوین در معماری پایدار شناخته می‌شود[۸]. با وجود تمرکز جهانی بر فناوری‌ها و عناصر طبیعی کاهنده مصرف انرژی، نیاز به بررسی عمیق‌تر تأثیر دیوارهای سبز و تهویه طبیعی بر عملکرد حرارتی و کاهش مصرف انرژی، در ساختمان‌های مسکونی، به‌ویژه آپارتمان‌های فاقد فضای سبز کافی، احساس می‌شود. هدف این پژوهش، تحلیل نقش دیوارهای سبز زنده و ترکیب آن‌ها با سیستم‌های تهویه طبیعی در آتریوم‌های مسکونی واقع در اقلیم‌های معتدل و مرطوب بر عملکرد حرارتی ساختمان ها است. پرسش‌های تحقیق شامل این موضوعات است که چه رابطه‌ای بین تغییرات مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی و استفاده از دیوارهای سبز در ترکیب با تهویه طبیعی در آتریوم‌ها وجود دارد؟ همچنین چگونه و به چه میزانی، یکپارچه‌سازی دیوار سبز و تهویه طبیعی در آتریوم می‌تواند به کاهش مصرف انرژی در فضاهای مسکونی منجر شود؟

نوآوری‌های این پژوهش در مرحله اول شامل تحلیل سیستم ترکیبی دیوار سبز به همراه تهویه در آتریوم است؛ درحالی‌که مطالعات پیشین این دو عامل را به‌صورت مجزا تحلیل کرده است و تمرکز بر راهکارهای منفرد (دیوار سبز یا تهویه) بوده است. این رویکرد یکپارچه، اثر هم‌افزایی بین دو راهکار را آشکار می‌کند که منجر به کاهش چشمگیرتر مصرف انرژی نسبت به کاربرد جداگانه آن‌ها می‌شود. مرحله بعدی نوآوری شامل مطالعه تأثیر سیستم ترکیبی مذکور در اقلیم معتدل و مرطوب شمال ایران (استان مازندران) بخصوص در آپارتمان‌های مسکونی است که تاکنون کمتر موردتوجه پژوهش‌های پیشین بوده است. این اقلیم به دلیل رطوبت بالا و الگوی باد خاص، چالش‌های منحصربه‌فردی در بهینه‌سازی انرژی ایجاد می‌کند. در مرحله بعدی این تحقیق منجر به کشف عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم شناسایی متغیرهای طراحی و محیطی از جمله نقش جهت باد و هندسه آتریوم است بر اثربخشی سیستم ترکیبی است که در پژوهش‌های پیشین موردبررسی قرار نگرفته است.

سیستم‌های سبز عمودی در آتریوم‌ها

آتریوم به‌عنوان یکی از عناصر شاخص هویت‌بخش فضاهای معماری، نقش بسزایی در تحولات معماری مدرن و پایدار ایفا کرده است [۹]. همچنین، این فضاها امکان ورود هوای تازه را در تمام ماه‌های سال فراهم نموده و به‌صورت پیش‌گرمایش در زمستان (در هنگام صبح) و پیش‌سرمایش (تهویه طبیعی) در تابستان عمل می‌کنند. تعدیل فشار باد توسط آتریوم‌ها، اثرات منفی جریان هوا در فضاهای داخلی را کاهش داده و محیطی مناسب برای تهویه طبیعی ایجاد می‌کند [۱۰]. آتریوم‌ها در مراکز تجاری به‌عنوان یک سیستم منفعل خورشیدی می‌توانند علاوه بر تأمین نور، مصرف سیستم‌های روشنایی و تهویه مصنوعی را کاهش دهند [۱۱]. یکی از جنبه‌های کلیدی در طراحی آتریوم‌های مدرن،

استفاده از سیستم‌های سبز عمودی است که نقش مهمی در ارتقای کیفیت زیست‌محیطی ایفا می‌کنند. این سیستم‌های سبز عمودی می‌توانند به شکل چشمگیری در کاهش مصرف انرژی از طریق کاهش ضریب هدایت حرارتی دیوارهای خارجی مؤثر باشند و هم‌زمان با بهبود عملکرد زیست‌محیطی، زیبایی‌شناسی معماری را نیز ارتقا دهند [۱۲].

پیشینه پژوهش

در چند سال گذشته، محققان روش‌های مختلفی از قبیل ارائه نمونه مدل، تحقیقات و محاسبات پیکره‌بندی را مطرح نمودند تا عملکردهای گرمایی و تهویه هوای آتریوم را شناسایی کنند که در ادامه به برخی از این پژوهش‌ها پرداخته شده است. در مقاله پیریایی و همکاران که در سال ۱۴۰۱ منتشر گردید، تحقیقی تحت عنوان تحلیل پارامترهای طراحی آتریوم با تأکید بر تشابهات عملکردی با حیاط مرکزی فلات مرکزی ایران، (مطالعه موردی: خانه‌های سنتی یزد) انجام شد که نشان داد علی‌رغم نقش مهم تهویه هوای طبیعی بر آتریوم، شرایط گرمایی درونی و کاهش بار استفاده از انرژی به‌مانند سیستم حیاط مرکزی، نقاط ضعفی از جمله اینکه چگونه پارامترهای طراحی مختلف بر شرایط گرمایی تأثیر می‌گذارد نیز مطرح است [۱۳]. در مقاله جبر و همکاران که در سال ۱۴۰۰ منتشر گردید، تحقیقی تحت عنوان ترکیب آتریوم و حیاط مرکزی در هندسه‌های مختلف و میزان تأثیرات آن بر کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی انجام شد که نشان داد آتریوم می‌تواند به‌عنوان یک میانجی اتلاف گرما از فضاهای مجاور را کاهش دهد و همچنین برای فضاهای مجاور گرما تولید کند و ترکیب حیاط مرکزی و آتریوم تأثیر بسزایی در کاهش مصرف انرژی به‌ویژه در ماه‌های گرم سال دارد [۱۴]. در مقاله نقدی نسب و همکاران که در سال ۱۳۹۸ منتشر گردید، تحقیقی تحت عنوان بررسی تأثیرات دیوار سبز هوشمند در کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت هوای داخل ساختمان انجام شد که نشان داد کاهش مصرف انرژی باعث بهبود کیفیت محیط داخلی ساختمان شده و همچنین می‌تواند به‌عنوان روشی کاربردی برای پاسخ به تغییرات عملکردی، اقتصادی، فرهنگی، اکولوژیک و در یک‌کلام در افزایش سطح انعطاف‌پذیری محیط داخلی، مؤثر باشد [۱۵]. در مقاله شکوهی دهکردی و همکاران که در سال ۱۳۹۶ منتشر گردید، تحقیقی تحت عنوان بررسی تأثیر بار برودتی و حرارتی بام سبز مرتبط با آتریوم بر مدیریت انرژی فضاهای آموزشی اقلیم سرد انجام شد که مزیت استفاده از بام سبز در بهبود بار حرارتی در زمستان و بار برودتی در تابستان در ساختمان‌هایی با بام سبز دارای آتریوم را نسبت به محیط‌هایی با بام‌های ۴۰ سانتی‌متری معمولی و یا بام‌های ۶۶ سانتی‌متری هم ضخامت با بام سبز در صرفه‌جویی در مصرف انرژی در تابستان و زمستان را نشان داد [۱۶].

در تحقیق حاضر نیز نشان می‌دهد که استفاده از دیوار سبز یکی از راهکارهای مؤثر در دستیابی به معماری پایدار است که اثرات آن را می‌توان در سه بعد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی دسته‌بندی کرد. از مهم‌ترین مزایای این فناوری، کاهش مصرف انرژی ساختمان‌هاست، چراکه دیوار سبز نقش مؤثری در کاهش اثر جزایر حرارتی شهری ایفا می‌کند و به‌عنوان یک عایق حرارتی و رطوبتی عمل می‌نماید. این سیستم با کاهش جذب تابش خورشیدی و ایجاد خنک‌سازی تبخیری، به تثبیت نسبی دما و کاهش نوسانات حرارتی کمک کرده و در نتیجه، موجب کنترل، هدایت، مدیریت و ذخیره‌سازی انرژی در ساختمان می‌شود. همچنین، در حوزه بهره‌وری انرژی، بررسی اصول طراحی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم معتدل و مرطوب نشان می‌دهد که تهویه طبیعی یکی از مؤلفه‌های کلیدی سامانه‌های خورشیدی ایستا در این اقلیم محسوب می‌شود و نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی ایفا می‌کند؛ بنابراین، تلفیق دو راهکار دیوار سبز و تهویه طبیعی در آتریوم ساختمان‌های مسکونی این اقلیم، می‌تواند نتایج نوینی در بهینه‌سازی رفتار حرارتی ساختمان‌ها ارائه دهد. این پژوهش، باتکیه‌بر مطالعات پیشین، به بررسی هم‌زمان تأثیر دیوار سبز و تهویه طبیعی در آتریوم ساختمان‌های مسکونی در اقلیم معتدل و مرطوب می‌پردازد. یکی از جنبه‌های نوآورانه این تحقیق، تمرکز بر تحلیل هم‌زمان این دو متغیر است، چراکه در پژوهش‌های پیشین، این عوامل اغلب به‌صورت مستقل مطالعه شده‌اند.

ازاین‌رو، این تحقیق تلاش دارد با ارائه یک رویکرد یکپارچه، تأثیرات هم‌افزای این دو راهکار را بر بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارتقای آسایش حرارتی در ساختمان‌های مسکونی بررسی نماید.

روش‌شناسی

این پژوهش به دنبال برآورد میزان کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های آپارتمانی مسکونی در اقلیم معتدل و مرطوب از طریق اعمال تهویه طبیعی و استفاده از سیستم دیوار زنده سبز بر جداره‌های آتریوم‌های موجود در این ساختمان‌ها است. روش تحقیق در این مطالعه توصیفی - تحلیلی و شبیه‌سازی است که به ارزیابی تأثیر یکپارچه‌سازی فرایند تهویه طبیعی و بهره‌مندی از جداره‌های سبز در جداره‌های آتریوم آپارتمان‌های مسکونی، بر رفتار حرارتی آن‌ها در اقلیم معتدل و مرطوب می‌پردازد. روش جمع‌آوری اطلاعات اسنادی بوده و داده‌های موردنیاز از منابع علمی معتبر، مراجع اقلیمی، بررسی‌های میدانی و نقشه‌های معماری استخراج شده‌اند. برای بررسی تأثیر تهویه طبیعی، آتریوم نیمه‌محصور (سه‌طرفه) انتخاب شده است. در این پژوهش، متغیرها به دو دستهٔ متغیرهای مستقل و وابسته تقسیم می‌شوند. متغیرهای مستقل شامل (تهویه طبیعی - دیوار سبز بر روی جداره‌های داخلی آتریوم - تراز ارتفاعی ساختمان و شرایط اقلیمی) است و متغیر وابسته شامل (دی‌اکسیدکربن - بار سرمایش و گرمایش و میزان مصرف انرژی) است.

در این پژوهش، شش نمونه آپارتمان مسکونی در استان مازندران انتخاب شده است (جدول ۱). فرآیند پژوهش به گونه ای است که ابتدا ساختمان های مورد بررسی بدون تهویه طبیعی و دیوار سبز بر روی جداره‌های داخلی آتریوم در نرم‌افزار شبیه‌ساز رفتار حرارتی ساختمان دیزاین بیلدر مدلسازی و شبیه‌سازی شده ومورد ارزیابی قرار گرفته اند و در مرحله بعد تهویه طبیعی (بر اساس سناریوی در نظر گرفته شده) و دیوار سبز بر روی جداره آتریوم اضافه می‌شود و نتایج حاصل تحلیل می گردد تا در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی این دو مرحله برای شش ساختمان با یکدیگر مقایسه شده و میزان کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار دی اکسید کربن به عنوان یکی از مهم ترین عوامل گرمایش زمین با استفاده از راه کارهای در نظر گرفته شده در این پژوهش برای ساختمان های مورد بررسی مشخص شود؛ بنابراین در این پژوهش شش نمونه ساختمان از شماره یک تا شش که در شهرهای بابل و بابلسر ، قائم‌شهر و ساری انتخاب شده اند در دو مرحله شبیه‌سازی شده و نتایج آن در قالب نمودارهای مرتبط با متغیرهای پژوهش جهت تفسیر و ارزیابی ارائه شده است. مرحله اول، شبیه‌سازی شش ساختمان بدون تهویه طبیعی و دیوار سبز بر روی جداره‌های آتریوم صورت‌گرفته است و در مرحله دوم، شبیه‌سازی شش ساختمان با تهویه طبیعی و دیوار سبز بر روی جداره‌های آتریوم انجام گرفته است. برای عملکرد مؤثر تهویه طبیعی در این پژوهش بر اساس شبیه‌سازی‌های متعدد چند شرط مهم در نظر گرفته شده است. ابتدا این که دمای هوای داخل می‌بایست بیش از دمای هوای بیرون باشد. دوم اینکه دمای هوای داخل باید بیشتر از ۲۲ درجه سانتی‌گراد باشد و سوم اینکه تهویه طبیعی در فواصل بین فروردین تا پایان شهریور انجام می‌شود. در صورت برقراری کامل هر سه شرط بازشوهای موجود در آتریوم‌ها به میزان ۵۰ درصد باز خواهند شد. در این تحقیق از نرم‌افزار دیزاین بیلدرکه یکی از مطرح‌ترین نرم‌افزارها در حوزه شبیه‌سازی، مدل‌سازی و تحلیل انرژی در ساختمان استفاده شده است. اعتبار این نرم‌افزار بر اساس استانداردهای BESTEST و اشری ۱۴ تأیید شده است [۱۷].

همچنین در این پژوهش، جهت تحلیل آماری از آزمون t-test زوجی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون (Python) و کتابخانه سای‌پای (SciPy) نسخه x.۳ انجام شده است که یکی از روش‌های استاندارد و دقیق برای تحلیل آماری داده‌های جفت شده (paired samples) است. این روش در مقالات علمی معتبر و منابع آماری استاندارد پذیرفته شده است و نتایج آن با نرم‌افزارهایی نظیر SPSS یا R نیز مطابقت دارد. تابع مورداستفاده در این برنامه به طور خودکار مراحل محاسبه تفاضل بین هر زوج داده (قبل و بعد مداخله)، محاسبه میانگین و انحراف معیار این تفاضل‌ها و استخراج مقدار p-value از توزیع t-student با درجه آزادی را انجام می‌دهد و نیازی به محاسبات دستی نیست.

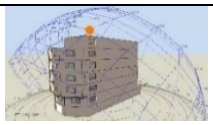
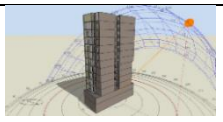
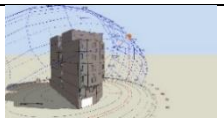
اقلیم موردمطالعه

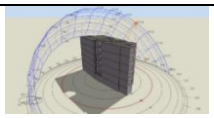
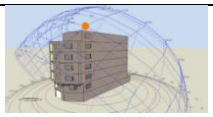
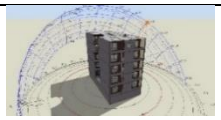
به‌منظور اعمال شرایط اقلیمی، اقلیم معتدل و مرطوب استان مازندران به‌عنوان نمونه انتخاب شده است. شهرهای موردبررسی در این پژوهش شامل شهرهای قائم‌شهر، بابل، بابلسر و ساری است. این شهرها به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط مشابه در اقلیم معتدل و مرطوب، می‌توانند نتایج پژوهش را به‌خوبی نمایندگی کنند. شهر قائم‌شهر به دلیل نزدیکی به ایستگاه هواشناسی قراخیل به‌عنوان پایلوت پژوهش در نظر گرفته شده است. همچنین، داده‌های اقلیمی شهرهای بابل، بابلسر، قائم‌شهر، و ساری نیز از طریق داده‌های نرم‌افزار متئونرم جمع‌آوری شده و در نرم‌افزار دیزاین بیلدر وارد شده است. داده‌های شبیه‌سازی شامل میزان تابش خورشید، دمای محیط، رطوبت نسبی، و جریان باد در بازه‌های ساعتی، روزانه، ماهانه و سالانه بوده است. این داده‌ها امکان تحلیل تأثیر تهویه طبیعی در حضور دیوار زنده سبز را فراهم کرده و نتایج بهینه‌سازی در طراحی ساختمان را ارائه می‌دهند.

نمونه‌های موردبررسی

در این پژوهش شش آپارتمان مسکونی جهت شبیه‌سازی در نظر گفته شده است. آپارتمان‌های در نظر گرفته شده را می‌توان به‌عنوان نمونه‌هایی از آپارتمان‌های مسکونی متداول با آتریوم برشمرد که در این پژوهش به لحاظ تراز ارتفاعی در طبقات گوناگون در نظر گرفته شده است. سطح زیربنای واحدهای آپارتمانی در هر طبقه بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ مترمربع و اغلب سه خوابه هستند و زمان ساخت آنها از سال ۱۳۸۰تا ۱۳۹۸ است. اطلاعات مربوط به ساختمان های مدل شده در جدول شماره ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات نمونه آپارتمان های مورد بررسی

ردیف	ساختمان مدل شده	شماره ساختمان	شهر انتخاب شده	تعداد طبقات	پلان طبقه اول شبیه‌سازی‌شده
۱		ساختمان شماره ۱	بابل	۷ طبقه	
۲		ساختمان شماره ۲	بابلسر	۱۱ طبقه	
۳		ساختمان شماره ۳	قائم‌شهر	۶ طبقه	

۴		ساختمان شماره ۴	قائم‌شهر	۶ طبقه	
۵		ساختمان شماره ۵	ساری	۶ طبقه	
۶		ساختمان شماره ۶	ساری	۶ طبقه	

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی شش ساختمان در اقلیم معتدل و مرطوب مازندران در دو حالت قبل از استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی و بعد از استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی در آتریوم آورده شده است. در ادامه اطلاعات پایه و نتایج شبیه‌سازی هر ساختمان به طور جداگانه آورده شده است.

ساختمان شماره ۱ در امیرکلا بابل

ساختمان شماره یک و بر اساس جدول شماره ۱ درشهر بابل و در هفت طبقه بنا شده است. متراژ هر طبقه از ۲۵۵ مترمربع تا ۲۹۵ مترمربع متغییر است و متراژ کل زیربنای ساختمان۲۵۵۲ مترمربع است. درهر طبقه به طور میانگین دو واحد با متراژ ۱۲۱ مترمربع و ۱۴۵ مترمربع وجود دارد. متراژ آتریوم موجود در هر طبقه برابر ۱۳ مترمربع است که با بازشوهایی به فضای داخلی مرتبط می‌شود. در مرحله اول ساختمان مورد نظر در نرم‌افزار دیزاین بیلدر مدلسازی و شبیه‌سازی شده که نتایج مرتبط با مصرف انرژی ساختمان در این مرحله در جدول۲ آورده شده است. در مرحله دوم فرآیند به گونه‌ای است که بر جداره‌های مات بیرونی آتریوم دیوار سبز زنده با ارتفاع ۱۲ سانتی متر و به صورت هیدروپونیک اضافه شده است. همچنین مکانیسم تهویه طبیعی برای پنجره‌ها و بازشوهای موجود بر اساس سناریوی ذکر شده در بخش قبل فعال می‌شود. نتایج حاصل از هر دو مرحله شبیه‌سازی در جدول شماره ۲ آورده شده است. در پنج نمونه دیگر نیز فرایند عملکرد تهویه طبیعی ومصالح دیوار سبز مانند ساختمان شماره ۱ است.

جدول ۲. اطلاعات تحلیل انرژی و تهویه در ساختمان شماره ۱ در شهر بابل

ردیف	عنوان فاز	میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده (کیلوگرم)	میزان مصرف انرژی به تفکیک بخش‌های مصرف‌کننده (مگاوات ساعت)	میزان مصرف انرژی کل به تفکیک حامل‌های انرژی (مگاوات ساعت)

			سرمایش	گرمایش	برق مصرفی	گاز مصرفی	مجموع گاز و برق
۱	ساختمان ۱ آتریوم بدون دیوار سبز و تهویه طبیعی	۸۴۶۳۱,۸۹	۷۳,۲۰	۱۵۵,۹۳	۹۱,۴۳	۱۵۵,۸۳	۲۴۷,۲۶
۲	ساختمان ۱ آتریوم با دیوار سبز و تهویه	۵۷۶۵۶,۸۸	۵۵,۰۵	۷۰,۶۹	۷۳,۲۶	۷۰,۶۹	۱۴۳,۹۵

ساختمان شماره ۲ در بابلسر

ساختمان دوم در شهر بابلسر و در ۱۱ طبقه بنا شده است. طبقات ۱تا ۴ دو واحدی با مساحت های ۱۱۰,۵ و ۸۸ مترمربع است و طبقات ۵ تا ۹ تک واحدی با متراژ ۲۰۰ مترمربع است. طبقه ۱۰ دو واحدی با مترازهای ۱۱۰,۵ و ۸۸ مترمربع است و طبقه ۱۱ تک واحدی با متراژ۱۱۰ متر است. آتریوم موجود در هر طبقه ۵,۵ مترمربع است که با بازشوهایی به فضای داخلی مرتبط می‌شود. در مرحله اول ساختمان موردنظر در نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود اطلاعات جهت تحلیل در جدول شماره ۳ ردیف یک آورده شده است. در مرحله دوم نیز به مانند بخش قبل به آتریوم ساختمان، دیوار سبز و تهویه طبیعی اضافه میشود و بطور مجدد در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و اطلاعات جدید استخراج می‌شود. اطلاعات این بخش در ردیف دوم جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. اطلاعات تحلیل انرژی و تهویه در ساختمان شماره ۲ در شهر بابلسر

ردیف	عنوان فاز	میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده (کیلوگرم)	میزان مصرف انرژی به تفکیک بخش‌های مصرف‌کننده (کیلووات‌ساعت)		میزان مصرف انرژی کل به تفکیک حامل‌های انرژی (مگاوات ساعت)		
			سرمایش	گرمایش	برق	گاز	مجموع گاز و برق
۱	ساختمان ۲ دارای آتریوم بدون دیوار سبز و تهویه طبیعی	۱۰۰,۵۱	۶۸۹۵۱,۵۷	۴۸۰۱۷,۲۹	۱۲۶,۶۶	۱۲۶,۶۶	۲۵۳,۳۲
۲	ساختمان ۲ آتریوم با دیوار سبز و تهویه طبیعی	۹۴,۵۲	۵۶۰۱۶,۹۶	۴۳۷۹۷,۷۷	۱۱۶,۷۷	۱۲۶,۶۵	۲۴۳,۴۲

ساختمان شماره ۳ درقائم شهر

ساختمان سوم در قائم‌شهر واقع شده است و در ۷ طبقه بنا شده است. زیربنای هر طبقه تقریباً ۴۰۰ متر است. آتریوم موجود در هر طبقه ۱۳،۸ مترمربع است که با بازشوهایی به فضای داخلی مرتبط می‌شود. در مرحله اول ساختمان مورد نظر در نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود اطلاعات جهت تحلیل در جدول شماره ۴ ردیف یک آورده شده است در مرحله دوم به آتریوم ساختمان، دیوار سبز و تهویه طبیعی اضافه می‌شود مجددا در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و اطلاعات جدید استخراج می‌شود و اطلاعات در ردیف دوم جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. اطلاعات تحلیل انرژی و تهویه در ساختمان شماره ۳ در شهر قائم شهر

ردیف	عنوان فاز	میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده (کیلوگرم)	میزان مصرف انرژی به تفکیک بخش‌های مصرف‌کننده (کیلووات‌ساعت)		میزان مصرف انرژی کل به تفکیک حامل‌های انرژی (مگاوات ساعت)		
			سرمایش	گرمایش	برق	گاز	مجموع گاز و برق
۱	ساختمان ۳ آتریوم بدون دیوار سبز	۷۲۲۱۲،۳۸	۵۹۶۵۰،۳۶	۶۱۶۱۳،۶۷	۱۰۰،۰۹	۶۱،۶۱	۱۶۱،۷
۲	ساختمان ۳ آتریوم با دیوار سبز و تهویه طبیعی	۶۷۴۸۴،۵۹	۵۵۰۸۴،۰۲	۵۲۵۳۹،۲۰	۹۵،۰۹	۵۲،۵۳	۱۴۷،۶۲

ساختمان شماره ٤ درقائم شهر

ساختمان چهارم در قائم‌شهر واقع شده است و در ۶ طبقه بنا شده است. زیربنای هر طبقه تقریباً ۳۰۰ مترمربع است. آتریوم موجود در هر طبقه ۱۲ مترمربع است که با بازشوهایی به فضای داخلی مرتبط می‌شود. در مرحله اول ساختمان مورد نظر در نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود اطلاعات جهت تحلیل در جدول شماره ۵ ردیف یک آورده شده است در مرحله دوم به آتریوم ساختمان، دیوار سبز و تهویه طبیعی اضافه می‌شود که نتایج آن در ردیف دوم جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. اطلاعات تحلیل انرژی و تهویه در ساختمان شماره ۴ در شهر قائم شهر

ردیف	عنوان فاز	میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده (کیلوگرم)	میزان مصرف انرژی به تفکیک بخش‌های مصرف‌کننده (مگاوات ساعت)	میزان مصرف انرژی کل به تفکیک حامل‌های انرژی (مگاوات ساعت)

			سرمایش	گرمایش	برق	گاز	مجموع گاز و برق
۱	ساختمان ۴ با آتریوم بدون دیوار سبز	۸۱۶۲۳,۰۵	۵۸,۹۶	۱۰۱,۲۱	۸۷,۸۹	۱۵۱,۳۰	۲۳۹,۱۹
۲	ساختمان ۴ آتریوم با دیوار سبز و تهویه طبیعی	۷۶۲۳۸,۰۲	۵۵,۶۳	۸۴,۰۸	۸۴,۳۷	۱۳۳,۸۹	۲۱۸,۲۶

ساختمان شماره ۵ در شهر ساری

ساختمان پنجم در شهر ساری واقع شده است و در ۶ طبقه بنا شده است. زیربنای هر طبقه تقریباً ۲۴۰ مترمربع است بعضی از طبقات تک واحدی به متراژ ۲۴۰ مترمربع هستند و بعضی از طبقات دو واحدی با متراژهای ۱۰۱ و ۱۳۲,۵ مترمربع هستد. آتریوم موجود در هر طبقه ۷,۸ مترمربع است که با بازشوهای مشخص شده در شکل شماره ۶ به فضای داخلی مرتبط می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی هر دو مرحله در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶. اطلاعات تحلیل انرژی و تهویه در ساختمان شماره ۵ در شهر ساری

ردیف	عنوان فاز	میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده (کیلوگرم)	میزان مصرف انرژی به تفکیک بخش‌های مصرف‌کننده (کیلووات‌ساعت)		میزان مصرف انرژی کل به تفکیک حامل‌های انرژی (کیلووات‌ساعت)		
			سرمایش	گرمایش	برق مصرفی	گاز مصرفی	مجموع گاز و برق
۱	ساختمان شماره ۵ دارای آتریوم بدون دیوار سبز و آتریوم	۵۱۸۵۶,۳۴	۳۶۸۲۴,۵۲	۴۰۱۶۲,۶۵	۶۲۳۷۶,۸۶	۷۴۹۴۱,۳۷	۱۳۷۳۱۸,۲۳
۲	ساختمان شماره ۵ آتریوم با دیوار سبز و تهویه طبیعی	۴۹۹۶۷,۲۸	۳۳۱۵۷,۹۹	۴۲۲۴۶,۴۸	۵۸۶۴۳,۰۴	۷۶۹۳۳,۴۱	۱۳۵۵۷۶,۴۵

ساختمان شماره ٦ در شهر ساری

ساختمان ششم در شهر ساری واقع شده است و در ۶ طبقه بنا شده است. زیربنای هر طبقه تقریباً ۳۳۶ مترمربع است تمامی طبقات تک واحدی به متراژ ۳۳۶ مترمربع هستند. متراژ آتریوم موجود در هر طبقه برابر ۱۷,۵۶ مترمربع

است که با بازشوهایی به فضای داخلی مرتبط می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساختمان در دو مرحله در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷. اطلاعات تحلیل انرژی و تهویه در ساختمان شماره ۶ در شهر ساری

ردیف	عنوان فاز	میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده (کیلوگرم)	میزان مصرف انرژی به تفکیک بخش‌های مصرف‌کننده (کیلووات‌ساعت)		میزان مصرف انرژی کل به تفکیک حامل‌های انرژی (مگاوات ساعت)		
			سرمایش	گرمایش	برق مصرفی	گاز مصرفی	گاز و برق
۱	ساختمان شماره ۶ ساری دارای آتریوم بدون دیوار سبز و آتریوم	۸۷۲۶۵,۴۳	۷۲۴۴۱,۷۲	۷۲۲۷۱,۴	۱۰۷,۰۵	۱۱۹,۳۹	۲۲۶,۴۴
۲	ساختمان شماره ۶ ساری آتریوم با دیوار سبز و تهویه طبیعی	۸۳۹۸۱,۹۸	۶۴۵۱۴,۸۲	۸۱۳۲۰,۱۷	۹۸,۹۲	۱۲۸,۱۶	۲۲۷,۰۸

نتایج و بحث

در جدول شماره ۸، میزان مصرف انرژی کل هر ساختمان در شش مکان مدنظر در منطقه معتدل و مرطوب در استان مازندران قبل و بعد از استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی در آتریوم ساختمان‌های مورد بررسی آورده شده است.

جدول ۸. مقایسه مصرف کل انرژی در دو حالت قبل و بعد از استفاده دیوار سبز و تهویه طبیعی در ساختمان در شش مکان نمونه

شهر	بابل	بابلسر	قائم‌شهر	قائم‌شهر	ساری	ساری
شماره ساختمان	ساختمان ۱	ساختمان ۲	ساختمان ۳	ساختمان ۴	ساختمان ۵	ساختمان ۶
مصرف کل انرژی در ساختمان دارای آتریوم بدون دیوار سبز و آتریوم (مگاوات ساعت)	۲۴۷,۲۶	۲۵۳,۳۲	۱۶۱,۷	۲۳۹,۱۹	۱۳۷,۳۱۸	۲۲۶,۴۴
مصرف کل انرژی در ساختمان دارای آتریوم با دیوار سبز و آتریوم تهویه طبیعی (مگاوات ساعت)	۱۴۳,۹۵	۲۴۳,۴۲	۱۴۷,۶۲	۲۱۸,۲۶	۱۳۵,۵۷	۲۲۷,۰۸

در جدول شماره ۹، مقایسه تولید دی اکسید کربن در دو حالت قبل و بعد از استفاده دیوار سبز و تهویه طبیعی در شش ساختمان نمونه آورده شده است.

جدول ۹. مقایسه تولید دی اکسید کربن در دو حالت قبل و بعد از استفاده دیوار سبز و تهویه طبیعی در در شش ساختمان نمونه

شهر	بابل	بابلسر	قائم‌شهر	قائم‌شهر	ساری	ساری
شماره ساختمان	ساختمان ۱	ساختمان ۲	ساختمان ۳	ساختمان ۴	ساختمان ۵	ساختمان ۶
دی‌اکسیدکربن در ساختمان دارای آتریوم بدون دیوار سبز و آتریوم (کیلوگرم)	۸۴۶۳۱,۸۹	۱۰۰۵۱۰	۷۲۲۱,۳۸	۸۱۶۲۳,۰۵	۵۱۸۵۶,۳۴	۸۷۲۶۵,۴۳
دی‌اکسیدکربن در ساختمان دارای آتریوم با دیوار سبز و آتریوم تهویه طبیعی (کیلوگرم)	۵۷۶۵۶,۸۸	۹۴۵۲۰	۶۷۴۸۴,۵۹	۷۶۲۳۸,۰۲	۴۹۹۶۷,۲۸	۸۳۹۸۱,۹۸

در جدول شماره ۱۰، مقایسه میزان گرمایش در دو حالت قبل و بعد از استفاده دیوار سبز و تهویه طبیعی در ساختمان در شش مکان نمونه بشرح ذیل آورده شده است.

جدول ۱۰. مقایسه میزان گرمایش در دو حالت قبل و بعد از استفاده دیوار سبز و تهویه طبیعی در ساختمان در شش مکان نمونه

شهر	بابل	بابلسر	قائم‌شهر	قائم‌شهر	ساری	ساری
شماره ساختمان	ساختمان ۱	ساختمان ۲	ساختمان ۳	ساختمان ۴	ساختمان ۵	ساختمان ۶
میزان گرمایش در ساختمان دارای آتریوم بدون دیوار سبز و آتریوم (مگاوات ساعت)	۱۵۵,۸۳	۴۸,۰۱۷	۶۱,۶۱	۱۰۱,۲۱	۴۰,۱۶	۷۲,۲۷
میزان گرمایش در ساختمان دارای آتریوم با دیوار سبز و آتریوم تهویه طبیعی (مگاوات ساعت)	۷۰,۶۹	۴۳,۷۹	۵۲,۵۳	۸۴,۰۸	۴۲,۲۴	۸۱,۳۲

در جدول شماره ۱۱، مقایسه میزان سرمایش در دو حالت قبل و بعد از استفاده دیوار سبز و تهویه طبیعی در ساختمان در شش مکان نمونه بشرح ذیل آورده شده است.

جدول ۱۱. مقایسه میزان سرمایش در دو حالت قبل و بعد از استفاده دیوار سبز و تهویه طبیعی در ساختمان در شش مکان نمونه

شهر	بابل	بابلسر	قائم‌شهر	قائم‌شهر	ساری	ساری
شماره ساختمان	ساختمان ۱	ساختمان ۲	ساختمان ۳	ساختمان ۴	ساختمان ۵	ساختمان ۶
میزان سرمایش در ساختمان دارای آتریوم بدون دیوار سبز و آتریوم (مگاوات ساعت)	۷۳,۲	۶۸,۹۵	۵۹,۶۵	۵۸,۹۶	۳۶,۸۲	۷۲,۴۴
میزان سرمایش در ساختمان دارای آتریوم با دیوار سبز و آتریوم تهویه طبیعی (مگاوات ساعت)	۵۵,۰۵	۵۶,۰۱	۵۵,۰۸	۵۵,۶۳	۳۳,۱۵	۶۴,۵۱

نتایج این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در ساختمان شماره ۱ در شهر بابل، بیشترین میزان کاهش مصرف انرژی مشاهده شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی در آتریوم این ساختمان در بخش گرمایش موجب کاهش ۵۴,۶ درصد مصرف گاز و در بخش سرمایش ۲۴,۷ درصد کاهش مصرف برق شده است. در مجموع، کاهش مصرف کل انرژی با تفکیک حامل‌های انرژی، ۴۱,۷ درصد برآورد شده است. علاوه بر این، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در این ساختمان با افزودن دیوار سبز و تهویه طبیعی به آتریوم، به میزان ۳۱,۸ درصد کاهش‌یافته است. در ساختمان شماره ۲ در بخش گرمایش به میزان ۸,۷ درصد کاهش مصرف انرژی در حالت استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی مشاهده می‌شود. در بخش سرمایش نیز به میزان ۱۸,۷ درصد کاهش مصرف انرژی در حالت استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی وجود دارد. در ساختمان شماره ۳ در بخش گرمایش به میزان ۱۴,۷درصد کاهش مصرف انرژی در حالت استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی مشاهده میشود. در بخش سرمایش نیز به میزان ۷ درصد کاهش مصرف انرژی در حالت استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی وجود دارد. در ساختمان شماره ۴ در بخش گرمایش به میزان ۱۶درصد کاهش مصرف انرژی در حالت استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی مشاهده می‌شود. در بخش سرمایش نیز به میزان ۵ درصد کاهش مصرف انرژی در حالت استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی وجود دارد. در ساختمان شماره ۵ در بخش گرمایش به میزان ۵ درصد افزایش مصرف انرژی در حالت استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی مشاهده می‌شود. در بخش سرمایش نیز به میزان ۱۰ درصد کاهش مصرف انرژی در حالت استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی وجود دارد. در ساختمان شماره ۶ در بخش گرمایش به میزان ۱۲درصد افزایش مصرف انرژی در حالت استفاده از دیوار سبز و تهویه طبیعی مشاهده می‌شود.

در تحلیل این بخش، علت عوامل مؤثر بر میزان کاهش مصرف انرژی را می‌توان شامل هندسه آتریوم، ویژگی‌های فضاهای متصل به آن، شرایط اقلیمی و تعداد طبقات ساختمان و جهت‌گیری ساختمان‌ها نسبت به باد دانست. این یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی آتریوم با درنظرگرفتن این متغیرها می‌تواند نقش بسزایی در بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا کند.

همچنین همانطور که در نتایج قوق ملاحظه می‌گردد، تنها در ساختمان شماره ۶، اثرگذاری راهکار سیستم ترکیبی به‌طور محسوسی متفاوت بود و در مواردی افزایش مصرف گاز مشاهده می‌گردد. این ناهمگونی می‌تواند ناشی از عوامل خاص طراحی معماری مانند جهت‌گیری نامطلوب شمالی ساختمان باشد که با تأثیر قوی عوامل محیطی مانند جهت باد در زمستان باعث وابستگی بیشتر به گرمایش در ساختمان شده است. از عوامل مهم دیگر این است که سطح آتریوم

این ساختمان (۱۷٫۴۵ مترمربع) نسبت به سایر ساختمان‌های نمونه بزرگتر است که در زمان تهویه طبیعی آتریوم در فصل زمستان باعث اتلاف حرارتی بیشتری می‌گردد و بدیهی است موجب افزایش مصرف گاز در بخش گرمایش شده است. همچنین امکان فعال بودن همزمان تهویه طبیعی آتریوم و سیستم گرمایشی ساختمان وجود دارد که این همپوشانی عملکرد دو سیستم ناسازگار نیز موجب افزایش بار گرمایش می‌گردد.

تحلیل آماری آزمون t-test زوجی

در این تحقیق، جهت تحلیل آماری و سنجش معناداری تفاوت‌ها از آزمون آماری t-test زوجی با استفاده از نرم‌افزار پایتون (Python) و کتابخانه آماری سای‌پای (SciPy) انجام شده است. این محیط برنامه‌نویسی، از جمله ابزارهای دقیق در تحلیل داده‌های آماری محسوب می‌شود؛ بنابراین برای بررسی تأثیر اجرای دیوار سبز و تهویه طبیعی آتریوم بر کاهش مصرف انرژی در ساختمان، تحلیل آماری بدین صورت انجام می‌گردد که در ابتدا داده‌های مصرف انرژی برای شش ساختمان نمونه در استان مازندران، در دو حالت قبل و بعد از اجرای دیوار سبز و تهویه آتریوم، با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزار دیزاین بیلدر استخراج می‌گردد و برای هر ساختمان، سه مقادیر مصرف انرژی گرمایش (Heating)، مصرف انرژی سرمایش (Cooling) و مجموع کل انرژی مصرفی ساختمان ثبت می‌گردد. در مرحله بعد، به‌منظور ارزیابی معناداری آماری تفاوت‌ها از آزمون t-test زوجی استفاده می‌گردد. این آزمون، تفاوت میانگین مصرف انرژی قبل و بعد از مداخله را در هر ساختمان (به‌صورت جفت‌شده) مقایسه می‌کند. فرض اولیه این است که اجرای دیوار سبز و تهویه آتریوم تغییری در مصرف انرژی ایجاد نکرده است و فرض ثانویه این خواهد بود که اجرای مداخله باعث تغییر معنادار مصرف انرژی شده است. جدول داده‌های انرژی قبل و بعد از سیستم ترکیبی و برای شش ساختمان نمونه در مازندران در جدول ۱۲ آورده شده که به‌عنوان اطلاعات اولیه به نرم‌افزار داده شده است.

جدول ۱۲. داده های انرژی قبل و بعد از سیستم ترکیبی و برای شش ساختمان نمونه در مازندران

ساختمان نمونه	مصرف کل انرژی (قبل)	مصرف کل انرژی (بعد)	مصرف انرژی گرمایش (قبل)	مصرف انرژی گرمایش (بعد)	مصرف انرژی سرمایش (قبل)	مصرف انرژی سرمایش (بعد)
۱	۲۵۳٫۲۲	۲۴۴٫۴۲	۱۵۵٫۸۳	۷۰٫۶۹	۷۳٫۲	۵۵٫۰۵
۲	۱۶۱٫۷	۱۴۷٫۶۲	۴۸٫۰۷	۴۲٫۷۹	۶۸٫۹۵	۵۶٫۰۱
۳	۲۲۹٫۱۹	۲۱۸٫۲۶	۶۱٫۶۱	۵۲٫۵۳	۵۹٫۶۵	۵۵٫۰۸
۴	۱۳۷٫۱۸	۱۳۵٫۵۷	۱۰۱٫۲۱	۸۴٫۰۱	۵۸٫۹۶	۵۵٫۶۳
۵	۲۴۴٫۲۶	۲۳۴٫۹۵	۴۰٫۱۶	۴۲٫۴۴	۳۶٫۸۲	۳۳٫۱۵
۶	۲۲۶٫۴۴	۲۲۷٫۰۸	۷۲٫۲۷	۸۱٫۴۲	۷۲٫۴۴	۶۴٫۵۱

نتایج حاصل از تحلیل آماری آزمون t-test زوجی در جدول ۱۳ نشان می‌دهد که دیوار سبز و تهویه طبیعی آتریوم باعث کاهش موثر در مصرف کل انرژی ساختمان و همچنین کاهش مصرف در بخش سرمایش و برق شده است و در این موارد دارای تأثیر معنادار بوده است که مطلوب این تحقیق است، ولی تأثیر معناداری بر مصرف گرمایش نداشته است. در تفسیر نتایج این تحلیل آماری می‌توان به این نکته اشاره نمود کاهش مصرف کل انرژی و کاهش مصرف در بخش سرمایش نه تنها قوی، بلکه یکدست‌تر است؛ بنابراین در آزمون مذکور تائید شده است، ولی با وجود کاهش عددی مصرف گاز در بخش گرمایش اغلب ساختمان‌های نمونه، بدلیل نوسانات عددی نسبتاً بالا بین ساختمان‌ها (بخصوص در

ساختمان شماره ۶)، کاهش مصرف گرمایش از نظر آماری معنادار تشخیص داده نشده است. دلایل آن نیز بطور خلاصه ناشی از عوامل خاص طراحی معماری مانند جهت‌گیری شمالی ساختمان است که با تأثیر قوی عوامل محیطی مانند جهت باد در زمستان باعث وابستگی بیشتر به گرمایش در ساختمان شده است. همچنین سطح آتریوم این ساختمان نسبت به سایر ساختمان‌های نمونه بزرگتر است که در زمان تهویه طبیعی آتریوم در فصل زمستان باعث اتلاف حرارتی بیشتری می‌گردد.

جدول ۱۳. نتایج تحلیل آماری آزمون t-test زوجی قبل و بعد از دیوار سبز و تهویه طبیعی در سه گروه مختلف و میانگین شش ساختمان نمونه

نتیجه تحلیل آماری	شرط	P-Value	T-tatistic	میانگین بعد	میانگین قبل	انواع مصرف انرژی
معنادار	P< 0.05	۰,۰۲۴۷	۳,۱۷	۲۰۱,۳۲	۲۰۸,۶۶	مصرف کل انرژی
غیرمعنادار	P> 0.05	۰,۲۶۶۱	۱,۲۵	۶۲,۳۱	۷۹۰۸۶	مصرف انرژی گرمایش
معنادار	P< 0.05	۰,۰۱۸۱	۳,۴۶	۵۳,۲۴	۶۱,۶۷	مصرف انرژی سرمایش

نتیجه‌گیری

ساختمان‌های مسکونی باتوجه‌به اهمیت زیاد از نظر اسکان جامعه بشری و ایجاد احساس آرامش و امنیت در محیط اجتماعی، تأثیر بسیار زیادی بر جوامع انسانی دارند [۱۸]. آتریوم به‌عنوان یک فضای باز داخلی نه‌تنها تأثیر بسزایی در بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی دارد، بلکه بر تجربه محیطی کاربران نیز اثرگذار است. معماران آگاه به مسئله انرژی از این فضا به‌عنوان راهکاری برای کنترل و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی بهره گرفته‌اند، چراکه مصرف بی‌رویه انرژی و پیامدهای زیست‌محیطی آن، به‌ویژه انتشار گازهای گلخانه‌ای، از چالش‌های اساسی معماری پایدار محسوب می‌شود. در این میان، دیوارهای سبز به دلیل قابلیت کاهش تلفات حرارتی، نقش مهمی در بهینه‌سازی عملکرد حرارتی ساختمان ایفا کرده و نیاز به سامانه‌های تهویه‌مطبوع را کاهش می‌دهند که این امر منجر به کاهش مصرف انرژی خواهد شد. استفاده هم‌زمان از دیوار سبز و تهویه طبیعی در آتریوم می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی مطرح شود. ازاین‌رو، بررسی تأثیر این سیستم ترکیبی بر مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم‌های معتدل و مرطوب، هدف اصلی این پژوهش را تشکیل داده است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که میزان کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مختلف، بسته به ویژگی‌های طراحی آتریوم، تعداد طبقات، شرایط اقلیمی و نحوه توزیع فضاهای متصل به آن، متغیر است. در میان ساختمان‌های مورد بررسی، بیشترین کاهش مصرف انرژی در ساختمان شماره ۱ در شهر بابل مشاهده شده است. این ساختمان با کاهش ۵۴٫۶ درصدی مصرف گاز و ۱۹٫۸ درصدی مصرف برق، مجموعاً به میزان ۴۱٫۷ درصد کاهش مصرف انرژی را تجربه کرده است. همچنین، در این ساختمان با به‌کارگیری دیوار سبز و تهویه طبیعی در آتریوم، میزان مصرف انرژی در بخش گرمایش به میزان ۵۴٫۶ درصد و در بخش سرمایش به میزان ۲۴٫۷ درصد کاهش یافته است که این امر موجب

کاهش ۳۱٫۸ درصدی تولید دی‌اکسیدکربن شده است. در سایر ساختمان‌های مورد بررسی، میزان تأثیر این راهکار بسته به شرایط طراحی و اقلیمی (جهت باد) متفاوت بوده و در برخی موارد، کاهش قابل‌توجهی در مصرف انرژی مشاهده نشده است. به‌عنوان‌مثال، در ساختمان‌های واقع در ساری، تغییرات مصرف انرژی کمتر بوده و در برخی موارد افزایش مصرف گاز نیز گزارش شده است که این موضوع نشان‌دهنده تأثیر عوامل محیطی و طراحی معماری بر عملکرد این راهکار ترکیبی است.

نتایج حاصل از تحلیل آماری آزمون t-test زوجی نشان می‌دهد که دیوار سبز و تهویه طبیعی آتریوم باعث کاهش مؤثر در مصرف کل انرژی ساختمان و همچنین کاهش مصرف در بخش سرمایش و برق شده است و دارای تأثیر معنادار بوده است که مطلوب این تحقیق است، ولی تأثیر معناداری بر مصرف گرمایش نداشته است که باوجود کاهش عددی مصرف گاز در بخش گرمایش اغلب ساختمان‌های نمونه، به دلیل نوسانات عددی نسبتاً بالا بین ساختمان‌ها (بخصوص در ساختمان شماره ۶)، کاهش مصرف گرمایش از نظر آماری معنادار تشخیص داده نشده است. دلایل آن نیز بطور خلاصه ناشی از عوامل خاص طراحی معماری مانند جهت‌گیری شمالی ساختمان است که با تأثیر قوی عوامل محیطی مانند جهت باد در زمستان باعث وابستگی بیشتر به گرمایش در ساختمان شده است. همچنین سطح آتریوم این ساختمان نسبت به سایر ساختمان‌های نمونه بزرگتر است که در زمان تهویه طبیعی آتریوم در فصل زمستان باعث اتلاف حرارتی بیشتری می‌گردد.

این پژوهش، زمینه مساعدی را برای مطالعات آتی، به‌ویژه در ارزیابی تأثیرات طولانی‌مدت این راهکار بر کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش پایداری زیست‌محیطی ساختمان‌ها است. ازاین‌رو، پژوهش‌های بیشتر در این حوزه، به‌ویژه با رویکردهای عملی و آزمایشگاهی، می‌تواند به درک عمیق‌تر اثرات این سیستم بر بهره‌وری انرژی و بهبود شرایط آسایش در ساختمان‌های مسکونی منجر شود.

باتوجه‌به ویژگی‌های منحصربه‌فرد اقلیم‌های معتدل و مرطوب، اصول طراحی پایدار ارائه‌شده در این پژوهش، پتانسیل تعمیم‌پذیری برای سایر مناطق با اقلیم‌های مشابه را نیز دارا خواهد بود.

References

[1] International Energy Agency. (2020). Energy Efficiency 2020: Buildings. https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2020

[2] Heydari, E., Mehdinejad, J., & Dolabi, P. (2022). [Strategic principles of residential building form design in Bushehr, based on reducing energy consumption]. Karafan Quarterly Scientific Journal, 18(4), 345–361. https://doi.org/10.48301/kssa.2022.306864.1761

[3] Omrany, H., Ghaffarianhoseini, A., Berardi, U., Ghaffarianhoseini, A., & Li, D. H. W. (2020). Is atrium an ideal form for daylight in buildings? Architectural Science Review, 63(5), 488–507. https://doi.org/10.1080/00038628.2020.1753018

[4] Abdollahi, S., Ahrari, M., & Ghazizadeh-Ahsaee, M. (2024). [Modeling and optimization of hybrid energy systems using techno-economic and environmental characteristics]. Karafan Quarterly Journal, 21(1), 203–235. https://karafan.nus.ac.ir/article_190993.html

[5] Nugroho, A. M. (2020). The impact of living wall on building passive cooling: A systematic review and initial test. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 448, p. 012120). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/448/1/012120

[6] Baghaei Daemei, A., Haghgooy Osmavandani, P., & Samim Nikpey, M. (2018). [Study on vernacular architecture patterns to improve natural ventilation estimating in humid subtropical climate]. Civil Engineering Journal, 4(9), 2097–2110. https://doi.org/10.28991/cej-03091157

[7] Taghavia, A. (2022). [Investigating the role of tourism and sustainable architecture to achieve sustainable development]. Journal of Social, Management and Tourism Letter, 1(1), 1–9. https://www.htpub.org/article/Journal-Of-Social,-Management-And-Tourism-Letter/vol/2022/num_method/yes/articleid/1072
[8] Sharples, S., & Lash, D. (2007). Daylight in atrium buildings: A critical review. Architectural Science Review, 50(4), 301–312. https://doi.org/10.3763/asre.2007.5037
[9] Moosavi, L., Mahyuddin, N., Ab Ghafar, N., & Ismail, M. A. (2014). Atrium cooling performance in a low energy office building in the Tropics: A field study. Building and Environment, 82, 246–263. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.026
[10] Shayanian, A., Mozaffari Qadiklayi, F., & Pahlavan, A. (2024). [The role of side walls of atriums and building intelligence in optimizing energy consumption in commercial centers of Tehran]. Journal of Geographical Science, 24(73), 294–310. https://jgs.khu.ac.ir/article-1-3942-en.html
[11] Shayanian, A., Mozaffari Ghadiklaei, F., & Pahlavan, A. (2022). [The effect of materials in reducing energy consumption in atrium commercial centers in the north and center of Tehran province]. Karafan Quarterly Journal, 18(4), 429–440. https://karafan.nus.ac.ir/article_133687.html
[12] Sabri, R., Rostami, R., & Mozaffari Ghadiklaei, F. (2024). [Thermal performance of double-layer green walls in optimizing energy consumption in a typical commercial office building in Tehran]. Karafan Quarterly Journal, 20(4), 179–194. https://karafan.nus.ac.ir/article_175878.html
[13] Piriai, M., Mofidi Shemirani, S. M., & Sabernejad, Z. (2023). [Analysis of atrium design parameters (with emphasis on functional similarities with the central courtyard of the central plateau of Iran), a case study of traditional houses in Yazd]. Islamic Art Studies, 19(45), 80–95. https://sid.ir/paper/1053999/fa
[14] Jabr, H., & Rezaei, S. (2022). [Combination of atrium and central courtyard in different geometries and its effects on reducing energy consumption in educational buildings]. Green Architecture, 3(1), 43–54. https://civilica.com/doc/1487784
[15] Naqdi Nesab, S., & Amini, M. (2019). [Investigating the effects of smart green walls on energy consumption reduction and improving indoor air quality]. Proceedings of the First International and Second National Conference Toward a Knowledge-Based Urban Planning, Architecture, Civil Engineering, and Art. https://sid.ir/paper/899568/en
[16] Shokohi Dehkordi, K., & Farhadian, M. (2016). [Investigating the cooling and thermal load effect of the green roof associated with the atrium on the energy management of cold climate educational spaces]. Environmental Science and Technology, 18(4), 572–583. https://civilica.com/doc/1288893
[17] Janzadeh, A., & Zandieh, M. (2015). [Feasibility of designing a zero energy neighborhood unit in Qazvin]. Proceedings of the National Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Urban Development. https://civilica.com/doc/619014
[18] Mahdavi, M., Hosseini, S., Babaafjeei, A., Chaghakaboodi, S., & Ghasemi, F. (2024). [Optimizing the life cycle of residential buildings by combining hierarchical analysis and value engineering methods with the classic and widely used AHP analysis model]. Karafan Quarterly Journal, 21(3), 347–366. https://karafan.nus.ac.ir/article_212354.html