ASPI | Afarand Scholarly Publishing Institute; Turkey
ISSN: 2538-4384; Geographical Researches. 2024;39(3):299-308 10.58209/geores.39.3.299

Energy Performance Modeling of Residential Isfahan Apartments Based on Geometric Characteristics

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Heydaripour O.[1] *MSc*
Taher Tolou Del M.S.[1]* *PhD*

How to cite this article
Heydaripour O, Taher Tolou Del MS. Energy Performance Modeling of Residential Isfahan Apartments Based on Geometric Characteristics. Geographical Researches. 2024;39(3):299-308.

[1]Department of Architecture, Faculty of Architectural Engineering and Urban Design, Shahid Rajaee Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran

***Correspondence**
Address: 9th Floor, Office of Dr. Taher Tolou Del, Faculty of Architectural Engineering and Urban Design, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran. Postal Code: 1678815811
Phone: +98 (21) 22970060
Fax: -
msttd@sru.ac.ir

Article History
Received: July 27, 2024
Accepted: August 28, 2024
ePublished: September 28, 2024

ABSTRACT

Aims The exponential increase in energy consumption in the residential sector and the unregulated design and construction of residential apartments in Isfahan have led to a critical energy consumption situation in the city. Therefore, the aim of this research was to model the relationship between the geometric characteristics of typical residential apartments and their energy performance for use in urban planning.

Methodology This was an applied study carried out in 2024 using quantitative research method including modeling, building energy simulation, regression modeling, and optimization. Geometric factors affecting building energy consumption were identified, coded for automated modeling, and entered into the cyclic process of performance-based computational design. The tools used in this research include Rhino software, the Grasshopper environment, and the Ladybug Tools, Colibri, and Wallacei plugins.

Findings The energy performance models could predict actual residential apartment energy consumption with over 88% accuracy and a correlation coefficient greater than 0.7. Based on the findings, increasing the land plot area led to a decrease in energy consumption per square meter. Additionally, a nearly square building layout with limited north-south elongation resulted in optimal energy performance. Reducing the height of internal spaces and maintaining a zero-degree orientation angle also contributed to optimal energy performance.

Conclusion The geometric characteristics of apartment housing significantly impact building energy consumption. Increasing the built-up area, having a length-to-width ratio close to one, a zero-degree orientation angle, and reducing the height of internal spaces in urban planning and municipal construction regulations reduces energy consumption in Isfahan.

Keywords Building Energy Simulation; Energy Performance Modeling; Energy Performance Optimization; Residential Apartments

CITATION LINKS

[Al-Shargabi *et al.*, 2022] Buildings' energy consumption prediction models based on buildings' characteristics ...; [Ali *et al.*, 2024] A comparative analysis of machine learning and statistical methods for evaluating building performance ...; [Asad Poor *et al.*, 2021] A human-centric participatory approach to energy-efficient ...; [Chen *et al.*, 2022] Physical energy and data-driven models ...; [Chong *et al.*, 2021] Occupancy data at different spatial resolutions ...; [Coakley *et al.*, 2014] A review of methods to match building ...; [Dino, 2016] An evolutionary approach for 3D architectural space layout ...; [Dino & Üçoluk, 2017] Multiobjective design optimization of building ...; [Ekici *et al.*, 2019] Performative computational architecture using ...; [Elbeltagi & Wefki, 2021] Predicting energy consumption for residential ...; [Feng *et al.*, 2022] An office building energy consumption forecasting model with dynamically combined residual error ...; [Gao *et al.*, 2019] Building information modelling ...; [González-Torres *et al.*, 2022] A review on buildings energy information ...; [Jin *et al.*, 2023] A review and reflection on open datasets of city-level ...; [Kabir *et al.*, 2020] An integrated approach of belief rule base and ...; [Liu *et al.*, 2023] A review of data-driven ...; [Liu *et al.*, 2023] Impact of urban form on building energy consumption and solar energy potential: A case study ...; [Liu *et al.*, 2019] A new algorithm of the best ...; [Mousavi *et al.*, 2023] Data-driven prediction and optimization toward net-zero and ...; [Musau & Steemers, 2008] Space planning and energy efficiency in office buildings: the ...; [Olu-Ajayi *et al.*, 2023] Building energy performance prediction: A reliability analysis ...; [Olu-Ajayi *et al.*, 2022] Machine learning for energy performance prediction ...; [Pan *et al.*, 2023] Building energy simulation and its application for building performance optimization: A review ...; [Poirazis, 2008] Single and double skin glazed office buildings ...; [Sariyildiz, 2012] Performative computational ...; [Souza & Alsaadani, 2012] Thermal zoning in speculative office buildings: discussing the connections between ...; [Wei *et al.*, 2014] Driving factors for occupant-controlled space heating ...; [Wei *et al.*, 2018] A review of data-driven approaches for prediction and classification ...; [Yi, 2016] User-driven automation for optimal thermal-zone layout during ...; [Zhang *et al.*, 2018] Rethinking the role of occupant behavior in building energy ...; [Zhuang *et al.*, 2021] A performance data integrated BIM framework for building life-cycle energy ...;

Copyright© 2024, the Authors | Publishing Rights, ASPI. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مدل‌یابی عملکرد انرژی آپارتمان‌های مسکونی شهر اصفهان بر مبنای مشخصات هندسی

امید حیدری‌پور MSc
گروه معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
محمدصادق طاهر طلوع دل* PhD
گروه معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

اهداف: افزایش تصاعدی مصرف انرژی در بخش مسکونی و طراحی و ساخت‌وساز آپارتمان‌های مسکونی بدون قاعده در شهر اصفهان منجر به شرایط بحرانی مصرف انرژی در این شهر شده است. بر همین اساس، هدف این پژوهش مدل‌یابی رابطه بین مشخصات هندسی آپارتمان‌های مسکونی متداول و عملکرد انرژی آنها به منظور استفاده در برنامه‌ریزی‌های کلان این شهر بود.

روش‌شناسی: پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و با رویکردی کمّی از طریق مدل‌سازی، شبیه‌سازی عملکرد انرژی و روش تجزیه و تحلیل داده‌ها، مدل‌یابی رگرسیونی و بهینه‌سازی انجام شد. ابزار شبیه‌سازی پژوهش، پلاگین لیدی باگ تولز، تحت محیط برنامه‌نویسی گراس‌هاپر و نرم‌افزار SPSS بود. تعداد نمونه در مدل‌یابی رگرسیونی ۲۶۸۸ و در هر بهینه سازی ۳۰۰۰ بود.

یافته‌ها: مدل‌های عملکرد انرژی پژوهش توانستند با دقت بالای ۸۸٪ و همبستگی بالای ۰/۷ مصرف واقعی آپارتمان مسکونی، مصرف انرژی را پیش‌بینی کنند. افزایش مساحت قطعات زمین، منجر به کاهش مصرف انرژی بر حسب متر مربع شد. همچنین یافته‌ها نشان داد که زیربنای نزدیک به مربع با کشیدگی محدود شمالی-جنوبی منجر به عملکرد بهینه انرژی می‌شود. کاهش ارتفاع فضاهای داخلی و زاویه جهت‌گیری صفر درجه نیز، عملکرد بهینه انرژی را به همراه داشت.

نتیجه‌گیری: مشخصات هندسی مسکن آپارتمانی، تاثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی ساختمان دارد. در این راستا، افزایش مساحت زیربنا و نسبت طول به عرض زیربنای نزدیک به یک، زاویه جهت‌گیری صفر درجه و کاهش ارتفاع فضاهای داخلی، منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود.

کلیدواژگان: شبیه‌سازی عملکرد انرژی، مدل‌یابی عملکرد انرژی، بهینه‌سازی عملکرد انرژی، آپارتمان‌های مسکونی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷
*نویسنده مسئول: msttd@sru.ac.ir

مقدمه

بخش ساختمان با به طور متوسط یک سوم کل مصرف انرژی، یکی از بزرگ‌ترین بخش‌های مصرف انرژی در سطح جهان است و افزایش تصاعدی جمعیت شرایطی بحرانی را در سطح جهان رقم زده است [Chong *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2018]. شهر اصفهان نیز به عنوان یکی از کلانشهرهای ایران، با افزایش بسیار زیاد مصرف انرژی در بخش مسکونی روبه‌رو است. با وجود اهمیت موضوع انرژی در ساختمان، طراحی و ساخت‌وساز بدون قاعده و ارزیابی کامل و با تکیه بر تجربه معمار، یک عمل مرسوم است [Chen *et al.*, 2022]. این در حالی است که عوامل کالبدی ساختمان، به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر عملکرد انرژی ساختمان مطرح می‌شود و رابطه کالبد ساختمان و عملکرد انرژی آن، در پژوهش‌های مختلفی مورد توجه قرار گرفته است [Wei *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2023]. به همین دلیل، امروزه، مدل‌یابی عملکرد انرژی آپارتمان‌های مسکونی بر مبنای مشخصات کالبدی ساختمان به یک نقطه حیاتی در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های کلانشهری تبدیل شده است [Elbeltagi & Wefki, 2021; González-Torres *et al.*, 2021; Zhuang *et al.*, 2021]. بر همین اساس، تلاش‌های زیادی در دهه‌های اخیر توسط دانشمندان و مهندسان بر روی توسعه رویکردهای پیش‌بینی مصرف انرژی انجام شده است [Jin *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2023]؛ اما مدل‌های حاصل از پژوهش‌ها، برای کاربر غیرمتخصص انرژی تعبیه نشده و امکان استفاده برای طراحان، برنامه‌ریزان و سیاستمداران را فراهم نمی‌کنند. همچنین در این بین، مدل مطلوبی نیز بر پیش‌بینی عملکرد انرژی آپارتمان‌های مسکونی در شهر اصفهان، در پژوهش‌های مختلف دیده نشده و ضرورت انجام این پژوهش را تایید می‌کند. به طور کلی، در برنامه‌ریزی‌های کلانشهری، نیاز به مدلی ساده و روشن از عملکرد انرژی است؛ تا بتواند در وضع قوانین و مقررات و استفاده از آنها، به‌خوبی توسط کاربران متنوع مورد استفاده قرار گیرد. عدم شناخت ویژگی‌های مدل شبیه‌سازی عملکرد انرژی، منجر به استفاده نادرست از ابزار می‌شود [Kabir *et al.*, 2020; Feng *et al.*, 2022]. بنابراین این پژوهش به مدل‌یابی تاثیر مشخصات هندسی آپارتمان‌های مسکونی متداول شهر اصفهان بر عملکرد انرژی ساختمان پرداخت. برای این منظور، ابتدا عوامل هندسی تاثیرگذار ساختمان بر مصرف انرژی شامل ابعاد اضلاع زیربنا، جهت‌گیری، ارتفاع داخلی واحدها، مساحت زیربنا، حجم ساختمان، پهنای پنجره‌ها و ارتفاع پنجره‌ها بر مبنای بررسی ادبیات موضوعی، شناسایی شده و مورد استفاده قرار گرفت.

به طور کلی، پژوهشگران [Al-Shargabi *et al.*, 2022; Coakley *et al.*, 2014; Wei *et al.*, 2014]، رویکردهای پیش‌بینی مصرف انرژی را در سه بخش شامل مدل انرژی کالبدی ساختمان با نام جعبه سفید (White Box)، مدل مبتنی بر داده با نام جعبه سیاه (Black Box) و مدل ترکیبی به نام جعبه خاکستری (Grey Box) تعریف می‌کنند. مدل‌های انرژی کالبدی ساختمان، بر اساس معادلات موازنه گرما و جرم که رفتار حرارتی دینامیکی ساختمان‌ها را نشان می‌دهند، عمل می‌کنند [Ali *et al.*, 2024]. در مقایسه با مدل‌های فیزیکی، مدل‌های مبتنی بر داده، بر اساس داده‌های تاریخی عمل می‌کنند [Mousavi *et al.*, 2023]. روش‌های مبتنی بر داده‌ها برای ساختمان‌هایی که پارامترهای فیزیکی دقیق ندارند، مانند ساختمان‌های در مرحله طراحی، به‌خوبی سازگار هستند [Pan *et al.*, 2023]. تعداد زیاد پارامترهای ورودی در مدل‌های انرژی ساختمان و تخصصی‌بودن و زمان‌بربودن مدل‌های مبتنی بر داده، منجر به ارایه مدل‌های ترکیبی شد؛ که یک مدل فیزیکی ساده با مزایای همزمان جعبه سفید و

سیاه هستند [Asad Poor *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2019]. علی‌رغم اهمیت بیان‌شده و کاربرد گسترده ابزارهای مختلف برای پیش‌بینی انرژی در ساختمان‌ها، در مورد مناسب‌ترین ابزار پیش‌بینی در شرایط مختف اتفاق نظر وجود ندارد [Olu-Ajayi *et al.*, 2023; Gao *et al.*, 2019]. سازوکار ابزارهای پیش‌بینی، در مدل‌های مختلف، به شرایط و ویژگی‌های شبیه‌سازی و عوامل دیگر بستگی دارد [Kabir *et al.*, 2020; Olu-Ajayi *et al.*, 2022]. در این پژوهش، به منظور مدل‌یابی مسکن بر مبنای عملکرد انرژی، به منظور استفاده در برنامه‌ریزی شهری از دو سازوکار مدل پیش‌بینی‌کننده و مدل بهینه‌سازی استفاده شده است. در دو مدل مطرح‌شده، از یک الگوریتم پارامتریک کامپیوتری در فرآیند طراحی محاسباتی عملکردی با هدف بهبود عملکرد ساختمان استفاده می‌شود [Ekici *et al.*, 2019; Sariyildiz, 2012] و این سازوکار، می‌تواند پارامترهای هندسی ساختمان را در اهداف عملکردی انرژی تا حد زیادی پیش‌بینی و بهینه‌سازی کند. روند رو به رشد ساخت‌وساز در مقیاس میان‌مرتبه در شهر اصفهان، این پژوهش را بر آن داشته که بر پایه مدل‌یابی عملکرد انرژی، تاثیر خصوصیات هندسی بر عملکرد انرژی ساختمان‌های مسکونی متداول شهر اصفهان را بررسی کند. بر این اساس، هدف از این پژوهش، مدل‌یابی و بررسی رابطه پیچیده بین مشخصات هندسی ساختمان و عملکرد انرژی به منظور تامین بستری کاربردی برای معماران، برنامه‌ریزان شهری و سیاست‌گذاران است.

روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و در سال ۱۴۰۳ در شهر اصفهان انجام شد. روش این پژوهش رویکرد کمّی داشت و شامل بخش‌های مدل‌سازی، شبیه‌سازی عملکرد انرژی می‌شد. همچنین روش تجزیه و تحلیل داده‌های شبیه‌سازی‌شده، مدل‌یابی رگرسیون خطی و بهینه‌سازی بود. جمعیت آماری مورد مطالعه مدل فیزیکی شبیه‌سازی‌شده ساختمان‌های مسکونی ۵ طبقه روی پیلوت در شهر اصفهان با مساحت زیربنای بین ۱۱۰ تا ۲۱۰ متر مربع به عنوان تیپ متداول آپارتمان‌های مسکونی شهر اصفهان بر پایه نتایج مرکز آمار ایران و سازمان نظام مهندسی بود. ثابت نگه‌داشتن تعداد طبقات در نمونه‌ها، به دلیل تاثیر زیاد و قابل پیش‌بینی این پارامتر بر عملکرد انرژی ساختمان بود. در بخش مدل‌یابی رگرسیونی، نمونه‌گیری به صورت هدفمند و تعداد نمونه‌ها، ۲۶۸۸ مدل فیزیکی ساختمان، بر مبنای گام‌بندی روی پارامترهای مورد بررسی تعریف شد (جدول ۱).

جدول ۱) عوامل هندسی شبیه‌سازی و گام‌بندی هر کدام

عوامل کلیدی	حداقل	حداکثر	میزان گام	تعداد گام	تعداد نمونه گام
ابعاد ضلع شمالی-جنوبی	۸	۲۲	۲	۸	۳۳۶
ابعاد ضلع شرقی-غربی	۸	۲۲	۲	۸	۳۳۶
ارتفاع واحدها	۲/۶	۳/۶	۰/۲	۶	۴۴۸
جهت‌گیری ساختمان	-۴۵	۴۵	۱۵	۷	۳۸۴

همچنین در بخش بهینه‌سازی، سه فرآیند مجزا، با توجه به بازه مساحتی مورد نظر پژوهش در مساحت‌های زیربنای ۱۱۰، ۱۶۰ و ۲۱۰ متر مربع، برای ساختمان‌های مسکونی ۵ طبقه روی پیلوت انجام شده و بر مبنای گام‌بندی تعریف شد (جدول ۲). نمونه‌گیری به صورت تصادفی بر مبنای الگوریتم تکاملی مورد استفاده و تعداد نمونه‌ها در هر فرآیند بهینه‌سازی، ۳۰۰۰ مدل فیزیکی ساختمان در قالب ۱۰۰ نسل و جمعیت ۳۰ عدد در هر نسل بود. ابزارهای پژوهش در مدل‌سازی و شبیه‌سازی، پلاگین لیدی باگ تولز ورژن ۱/۸ تحت محیط برنامه‌نویسی گراس‌هاپر در نرم‌افزار راینو ورژن ۸، در فرآیند بهینه‌سازی، پلاگین کولیبری ورژن ۲ و والیسی ورژن ۲/۷ تحت محیط برنامه‌نویسی گراس‌هاپر در نرم‌افزار راینو ورژن ۸ و در فرآیند مدل‌یابی رگرسیونی، نرم‌افزار SPSS ورژن ۲۷ بود.

جدول ۲) گام‌بندی ژن‌های مدل‌های پیکربندی فضایی فرآیند بهینه‌سازی شماره دو

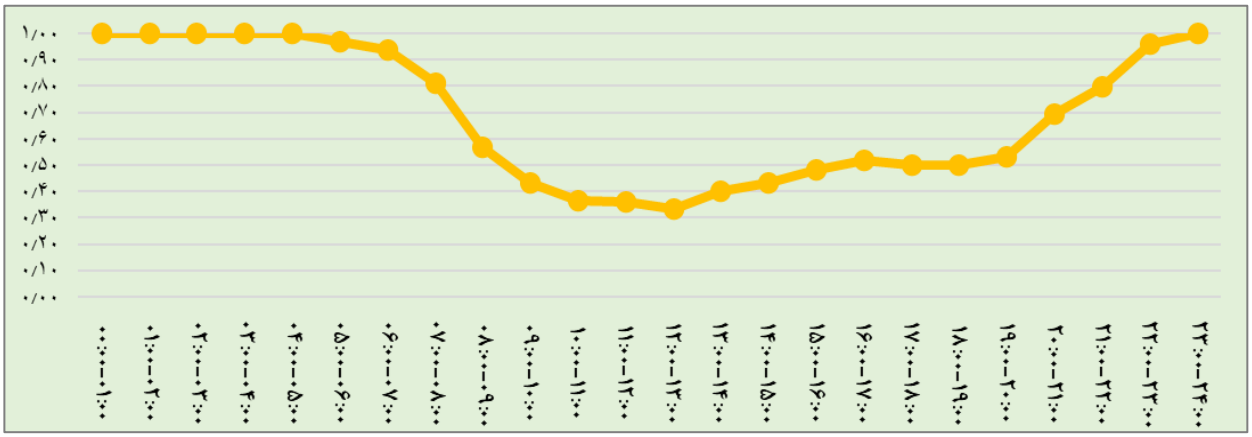
مساحت زیربنا	گام‌بندی	ابعاد ضلع شرقی-غربی	ارتفاع واحدهای ساختمان	جهت‌گیری ساختمان
۱۱۰ متر مربع	گام حداقل	۷	۲/۶	-۴۵
	گام حداکثر	۱۵	۴	۴۵
	مقدار هر گام	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۱	۵
	تعداد حالت گام	۹۰۰۰۰۰۰	۱۴	۱۸
۱۶۰ متر مربع	گام حداقل	۷	۲/۶	-۴۵
	گام حداکثر	۲۲	۴	۴۵
	مقدار هر گام	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۱	۵
	تعداد حالت گام	۱۶۰۰۰۰۰۰	۱۴	۱۸
۲۱۰ متر مربع	گام حداقل	۷	۲/۶	-۴۵
	گام حداکثر	۳۰	۴	۴۵
	مقدار هر گام	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۱	۵
	تعداد حالت گام	۲۲۰۰۰۰۰۰	۱۴	۱۸

بر این اساس، در مرحله اول، مدل‌سازی و ساخت الگوریتم شبیه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان انجام شد. در این راستا، از بین ساختمان‌های جنوبی و شمالی در این شبیه‌سازی، ساختمان‌های جنوبی (درب به ساخت)، مد نظر قرار گرفت. بر این اساس، نسبت پنجره به دیوارهای ذکرشده در پژوهش حاضر ثابت در نظر گرفته شد. همچنین، بر مبنای مشاهدات میدانی، در شهر اصفهان بیشترین فراوانی روش ساخت، مربوط به سیستم تیرچه با بلوک پلی استارین و دیوارهای با آجر سفالی بود. بر این اساس، مصالح مورد استفاده در این روش ساخت به عنوان یک عامل ثابت وارد الگوریتم مدل‌یابی شد (جدول ۳).

همه برنامه‌های زمان‌بندی در الگوریتم مدل‌یابی پژوهش به غیر از برنامه زمان‌بندی سکونت، بر مبنای استاندارد اشرای (ASHRAE) ورژن ۹۰/۱ برنامه زمان‌بندی آپارتمان مسکونی میان‌مرتبه (Midrise Apartment) و زیرگروه آپارتمان تعریف شد. برنامه زمان‌بندی سکونت نیز در قالب یک پیمایش پرسش‌نامه‌ای بر روی ۳۹۰ نفر ساکنین شهر اصفهان بر مبنای روش یک نمونه‌گیری تصادفی به‌دست آمده است (نمودار ۱).

جدول ۳) سازه‌های طرح و مصالح شبیه‌سازی هر کدام

سازه	مصالح از خارج به درون	R-Val	U-Fac
سقف خارجی	سرامیک، ملات ماسه سیمان، ایزوگام، فوم بتن، بتن مسلح، بلوک پلی استایرن، ملات گچ و خاک، ملات گچ	۷/۲۹۰	۰/۱۳۴
سقف داخلی	سرامیک، ملات ماسه سیمان، فوم بتن، بتن مسلح، بلوک پلی استایرن، ملات گچ و خاک، ملات گچ	۷/۲۶۹	۰/۱۳۴
دیوار خارجی	آجر نسوز، ملات ماسه سیمان، آجر سفالی، ملات گچ و خاک، ملات گچ	۰/۴۲۰	۱/۷۱۲
دیوار داخلی	ملات گچ، ملات گچ و خاک، آجر سفالی، ملات گچ و خاک، ملات گچ	۰/۳۳۵	۲/۰۰۴
کف داخلی	ملات گچ، ملات گچ و خاک، بلوک پلی استایرن، بتن مسلح، فوم بتن، ملات ماسه سیمان، سرامیک	۷/۲۶۹	۰/۱۳۴
کف زمین	بتن مسلح، سنگ پوکه، لایه شن و ماسه، فوم بتن، ملات ماسه سیمان، سنگ تراورتن	۰/۵۱۵	۱/۴۸۰



نمودار ۱) برنامه زمان‌بندی سکونت شهروندان اصفهان بر مبنای پیمایش انجام‌شده در پژوهش

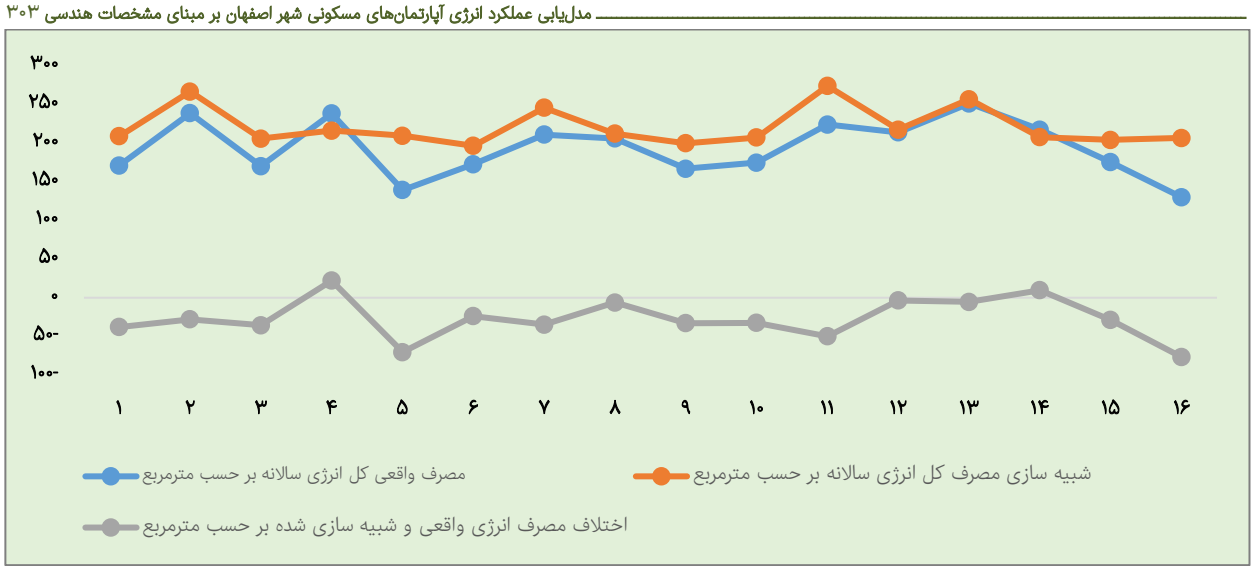
در مرحله دوم، اعتبارسنجی پاسخ‌های الگوریتم شبیه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان انجام شد. به همین منظور، ۱۶ واحد مسکونی مطابق با مشخصات مورد نظر پژوهش در مناطق مختلف شهر اصفهان و در ابعاد مختلف، به صورت تصادفی انتخاب شده و مصرف انرژی برق و گاز آنها، بر مبنای قبض‌های ماهانه برای مدت یک سال، به‌دست آمد. به منظور اعتبارسنجی، نتایج مصرف واقعی واحدهای مسکونی با نتایج شبیه‌سازی‌شده در الگوریتم پژوهش بر حسب کیلووات ساعت، از طریق بررسی آمار توصیفی و آزمون همبستگی پیرسون مقایسه شد. در مرحله سوم، مدل‌یابی رگرسیونی عملکرد انرژی ساختمان انجام شد. برای این منظور، ابتدا بر اساس ابزار کولیبری و بر مبنای گام‌بندی انجام‌شده، داده‌های شبیه‌سازی گردآوری شد. سپس با استفاده از ابزار SPSS و از طریق آزمون همبستگی و آزمون رگرسیون خطی مدل‌یابی بر روی مصرف انرژی، نیاز سرمایشی و نیاز گرمایشی بر حسب متر مربع انجام شد.

همچنین در مرحله چهارم، بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان انجام شد. برای این منظور، با توجه به تاثیر زیادی مساحت بر عملکرد انرژی، سه فرآیند بهینه‌سازی با توجه به بازه مساحتی مورد نظر پژوهش در مساحت‌های زیربنای ۱۱۰، ۱۶۰ و ۲۱۰ متر مربع، برای ساختمان‌های مسکونی ۵ طبقه روی پیلوت بر مبنای الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب دو با اهداف نیاز سرمایشی بر حسب متر مربع، نیاز گرمایشی بر حسب متر مربع و میانگین شاخص نور مفید روز انجام شد. بر این اساس، در انتها، سه مدل پیش‌بینی عملکرد انرژی و مشخصات هندسی ساختمان بر مبنای عملکرد انرژی بهینه به‌دست آمد.

یافته‌ها

پس از تنظیم الگوریتم شبیه‌سازی عملکرد انرژی، به منظور اعتبارسنجی، بررسی تطبیقی مصرف انرژی واقعی ۱۶ واحد مسکونی در شهر اصفهان با نتایج مصرف انرژی مدل شبیه‌سازی‌شده، نشان داد که میانگین اختلاف مصرف انرژی کل واقعی و شبیه‌سازی‌شده، حدود ۸۴۱- کیلووات ساعت و میانگین اختلاف مصرف انرژی واقعی و شبیه‌سازی‌شده بر حسب متر مربع ۱/۴۷۵- کیلووات ساعت بود (نمودار ۲). بر این اساس، میانگین درصد اختلاف مصرف انرژی واقعی و شبیه‌سازی‌شده نسبت به مصرف انرژی واقعی، ۳/۳-% به‌دست آمد. همچنین در آزمون همبستگی بین مقادیر مصرف انرژی واقعی و شبیه‌سازی‌شده واحدهای مسکونی، معناداری کمتر از ۰/۰۵ و ضریب همبستگی، بالاتر از ۰/۷۵ به‌دست آمد و اعتبار فرآیند شبیه‌سازی تایید شد.

همچنین، در ادامه بر مبنای گام‌بندی انجام‌شده، ۲۶۸۸ شبیه‌سازی انجام شد و بر مبنای داده‌های به‌دست‌آمده، ابتدا آزمون همبستگی بین عوامل هندسی و اهداف عملکرد انرژی انجام شد (جدول ۴). بیشترین میزان همبستگی بین اهداف عملکردی و عوامل هندسی، مربوط به رابطه حجم ساختمان و مصرف انرژی کل با ضریب ۰/۹۹۱ بود. پس از آن، بیشترین همبستگی مربوط به رابطه مساحت زیربنای ساختمان با مصرف انرژی کل، با ضرایب همبستگی ۰/۹۵۵ بود (جدول ۴). به طور کلی، نتایج آزمون همبستگی، حساسیت خروجی‌های الگوریتم را نسبت به ورودی‌های الگوریتم تایید کرد. در ادامه، به منظور مدل‌یابی عملکرد انرژی و بررسی اهمیت هر کدام از عوامل هندسی در مقایسه با یکدیگر، از آزمون رگرسیون خطی استفاده شد.



نمودار ۲) بررسی تطبیقی مصرف انرژی واقعی و شبیه‌سازی‌شده بر حسب متر مربع واحدهای مسکونی انتخابی

جدول ۴) نتایج آزمون همبستگی بین عوامل هندسی و اهداف عملکردی شبیه‌سازی

عوامل هندسی	مصرف انرژی کل واحد	مصرف انرژی بر حسب متر مربع	نیاز سرمایشی کل واحد	نیاز سرمایشی بر حسب متر مربع	نیاز گرمایشی کل واحد	نیاز گرمایشی بر حسب متر مربع
ابعاد ضلع شرقی-غربی	**۰/۶۹۳	**-۰/۵۶۵	**۰/۸۲۲	**-۰/۲۳۵	**۰/۳۶۳	**-۰/۸۰۵
ابعاد ضلع شمالی-جنوبی	**۰/۶۸۲	**-۰/۶۰۲	**۰/۴۹۰	**-۰/۸۲۹	**۰/۸۲۸	**-۰/۲۱۶
جهت‌گیری	۰/۰۰۴	۰/۰۱۲	۰/۰۰۹	۰/۰۱۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵
ارتفاع واحدهای ساختمان	**۰/۱۶۵	**۰/۴۶۰	**۰/۲۲۰	**۰/۳۶۱	**۰/۴۰۴	**۰/۴۶۸
مساحت زیربنای ساختمان	**۰/۹۸۱	**-۰/۸۱۰	**۰/۹۲۹	**-۰/۷۳۸	**۰/۸۳۲	**-۰/۷۱۱
حجم ساختمان	**۰/۹۹۱	**-۰/۶۸۱	**۰/۹۵۵	**-۰/۶۳۳	**۰/۹۱۱	**-۰/۵۸۳
پهنای پنجره جنوبی	**۰/۶۷۷	**-۰/۵۹۸	**۰/۸۰۰	**-۰/۲۶۲	**۰/۳۲۸	**-۰/۸۳۷
ارتفاع پنجره جنوبی	**۰/۱۶۵	**۰/۴۶۰	**۰/۲۲۰	**۰/۳۶۱	**۰/۴۰۴	**۰/۴۶۸
پهنای پنجره شمالی	**۰/۶۴۲	**-۰/۶۴۰	**۰/۷۵۵	**-۰/۳۰۱	**۰/۲۷۰	**-۰/۸۷۵
ارتفاع پنجره شمالی	**۰/۱۶۵	**۰/۴۶۰	**۰/۲۲۰	**۰/۳۶۱	**۰/۴۰۴	**۰/۴۶۸

**. همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنادار است؛ *. همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنادار است

جدول ۵) نتایج آزمون رگرسیون خطی بین مصرف انرژی بر حسب متر مربع و عوامل هندسی

مدل	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	t	معناداری
	b	خطای استاندارد	بتا		
عدد ثابت	۱۹۹/۲۷۳	۳/۵۶۹	-	۵۵/۸۳۴	۰/۰۰۰۱
ابعاد ضلع شرقی-غربی	-۳/۲۸۵	۰/۶۵۰	-۰/۵۶۰	-۰/۰۵۳	۰/۰۰۰۱
ابعاد ضلع شمالی-جنوبی	-۳/۱۵۰	۰/۱۲۲	-۰/۵۳۷	-۲۵/۷۴۱	۰/۰۰۰۱
جهت‌گیری	۰/۰۱۱	۰/۰۰۵	۰/۰۱۲	۱/۹۳۸	۰/۰۵۳
مساحت زیربنای ساختمان	۰/۱۸۳	۰/۰۲۱	۰/۶۷۸	۸/۹۴۴	۰/۰۰۰۱
حجم ساختمان	-۰/۰۱۳	۰/۰۰۱	-۰/۸۰۰	-۱۱/۰۱۷	۰/۰۰۰۱
پهنای پنجره شمالی	۰/۵۰۱	۰/۹۰۶	۰/۰۶۲	۰/۵۵۴	۰/۵۸۰
ارتفاع پنجره شمالی	۵۲/۳۵۰	۱/۵۰۴	۰/۶۶۵	۳۴/۷۹۶	۰/۰۰۰۱

بر مبنای آزمون رگرسیون برای رابطه مصرف انرژی بر حسب متر مربع با عوامل هندسی، میزان آر اسکوار، ۰/۹۴۹ به‌دست آمد. در این آزمون، سه عامل کالبدی شامل ارتفاع واحدها، پهنا و ارتفاع پنجره جنوبی به دلیل همبستگی بالای این عوامل با عوامل دیگر از معادله خارج شد. بیشترین سهم در معادله مصرف انرژی کل، به‌ترتیب مربوط به حجم ساختمان و مساحت زیربنای ساختمان و کمترین سهم در معادله رگرسیون، به‌ترتیب مربوط به جهت‌گیری و پهنای پنجره شمالی بود (جدول ۵).

بر مبنای یافته‌های آزمون رگرسیون، معادله مصرف انرژی بر حسب متر مربع، توانست ۹۴/۹٪ مصرف انرژی بر حسب متر مربع را با ضریب اطمینان ۹۹٪، پیش‌بینی کند. این معادله به شرح زیر است:

$$GEC/m^2=199.273+(-3.285\times EWD)+(-3.150\times NSD)+(0.011\times BD)+(0.183\times BA)+(-0.013\times BV)+(0.501\times WNW)+(52.350\times HNW)$$

همچنین، بر مبنای آزمون رگرسیون برای رابطه نیاز سرمایشی بر حسب متر مربع با عوامل هندسی ساختمان، میزان آر اسکوار، ۰/۸۷۹ به‌دست آمد و در این آزمون نیز، سه عامل کالبدی شامل ارتفاع واحدها، پهنا و ارتفاع پنجره جنوبی از معادله خارج شد.

بر اساس نتایج آزمون رگرسیون، بیشترین سهم در معادله رگرسیون نیاز سرمایشی بر حسب متر مربع، به‌ترتیب مربوط به دو عامل هندسی حجم ساختمان و مساحت زیربنای ساختمان و کمترین سهم در معادله حاضر، به‌ترتیب مربوط به دو عامل زاویه جهت‌گیری و ابعاد ضلع شرقی-غربی بود (جدول ۶). بر مبنای یافته‌های آزمون رگرسیون، معادله نیاز سرمایشی بر حسب متر مربع، توانست ۸۷/۹٪ نیاز سرمایشی بر حسب متر مربع را با ضریب اطمینان ۹۹٪ پیش‌بینی کند. این معادله به شرح زیر است:

$$CED/m^2=89.303+(1.122\times EWD)+(-2.745\times NSD)+(0.008\times BD)+(0.127\times BA)+(-0.009\times BV)+(-2.573\times WNW)+(21.464\times HNW)$$

همچنین، بر مبنای آزمون رگرسیون خطی برای رابطه نیاز گرمایشی بر حسب متر مربع با عوامل هندسی، میزان آر اسکوار، ۰/۹۲۳ به‌دست آمد. در این آزمون نیز، سه عامل کالبدی شامل ارتفاع واحدها، پهنا و ارتفاع پنجره جنوبی از معادله خارج شد. بر اساس نتایج آزمون، بیشترین سهم در معادله رگرسیون نیاز گرمایشی بر حسب متر مربع، به‌ترتیب مربوط به دو عامل هندسی ابعاد ضلع شرقی-غربی و ارتفاع پنجره شمالی و کمترین سهم در معادله، به‌ترتیب مربوط به دو عامل جهت‌گیری و ابعاد ضلع شمالی-جنوبی بود (جدول ۷).

بر مبنای آزمون رگرسیون خطی، معادله نیاز گرمایشی بر حسب متر مربع ، توانست ۹۲/۳٪ نیاز گرمایشی را با ضریب اطمینان بالای ۹۹٪، پیش‌بینی کند. این معادله به شرح زیر است:

$$HED/m^2=35.766+(-4.407\times EWD)+(-0.407\times NSD)+(0.002\times BD)+(0.056\times BA)+(-0.005\times BV)+(3.074\times WNW)+(30.886\times HNW)$$

جدول ۶) نتایج آزمون رگرسیون خطی نیاز سرمایشی بر حسب متر مربع و عوامل هندسی

مدل	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	t	معناداری
	b	خطای استاندارد	بتا		
عدد ثابت	۸۹/۳۰۳	۲/۳۰۹	-	۳۸/۹۸۲	۰/۰۰۰۱
ابعاد ضلع شرقی-غربی	۱/۱۲۲	۰/۴۲۱	۰/۳۲۵	۲/۶۶۸	۰/۰۰۸
ابعاد ضلع شمالی-جنوبی	-۲/۷۴۳	۰/۰۷۹	-۰/۷۹۵	-۳۴/۶۵۲	۰/۰۰۰۱
جهت‌گیری	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	۰/۰۱۶	۲/۳۶۰	۰/۰۱۸
مساحت زیربنای ساختمان	۰/۱۲۷	۰/۰۱۳	۰/۸۰۱	۹/۶۰۲	۰/۰۰۰۱
حجم ساختمان	-۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	-۰/۸۸۲	-۱۱/۰۲۲	۰/۰۰۰۱
پهنای پنجره شمالی	-۲/۵۷۳	۰/۵۸۶	-۰/۵۳۹	-۴/۳۹۲	۰/۰۰۰۱
ارتفاع پنجره شمالی	۲۱/۴۶۴	۰/۹۷۳	۰/۴۶۴	۲۲/۰۵۵	۰/۰۰۰۱

جدول ۷) نتایج آزمون رگرسیون خطی نیاز گرمایشی بر حسب متر مربع و عوامل هندسی

مدل	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	t	معناداری
	b	خطای استاندارد	بتا		
عدد ثابت	۳۵/۷۶۶	۱/۶۶۷	-	۲۱/۴۶۱	۰/۰۰۰۱
ابعاد ضلع شرقی-غربی	-۴/۴۰۷	۰/۳۰۴	-۱/۴۱۶	-۱۴/۵۱۶	۰/۰۰۰۱
ابعاد ضلع شمالی-جنوبی	-۰/۴۰۷	۰/۰۵۷	-۰/۱۳۱	-۷/۱۲۳	۰/۰۰۰۱
جهت‌گیری	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۸۸۱	۰/۳۷۹
مساحت زیربنای ساختمان	۰/۰۵۶	۰/۰۱۰	۰/۳۹۱	۵/۸۵۴	۰/۰۰۰۱
حجم ساختمان	-۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	-۰/۵۳۳	-۸/۳۲۴	۰/۰۰۰۱
پهنای پنجره شمالی	۳/۰۷۴	۰/۴۲۳	۰/۷۱۳	۷/۲۷۰	۰/۰۰۰۱
ارتفاع پنجره شمالی	۳۰/۸۸۶	۰/۷۰۳	۰/۷۴۰	۴۳/۹۶۳	۰/۰۰۰۱

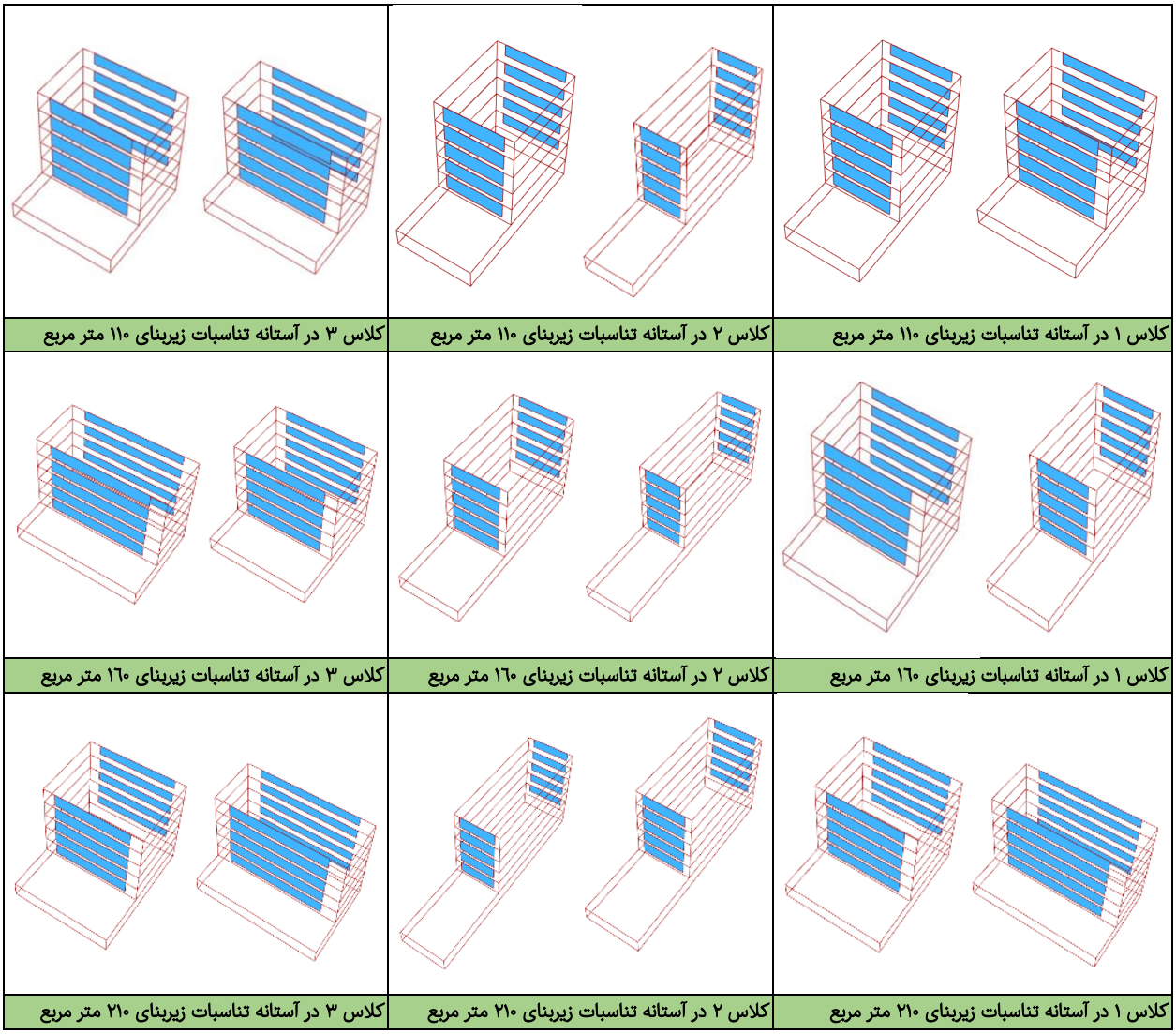
بر این اساس، همه معادلات ذکرشده به طور میانگین بیش از ۹۰٪ عملکرد انرژی ساختمان‌های جنوبی ۵ طبقه متداول شهر اصفهان پیش‌بینی کردند؛ که میزان قابل توجهی است. همچنین در ادامه، بهینه‌سازی در سه مساحت زیربنای ۱۱۰، ۱۶۰ و ۲۱۰ متر مربع و با استفاده از الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب ۲ در قالب انجام شد و بر اساس نتایج، در هر مساحت، ۳۰ پاسخ نسل ۹۹، به عنوان پاسخ‌های بهینه مرز پارتو به‌دست آمد. پاسخ‌ها نشان از همبستگی دو هدف عملکردی نیاز سرمایشی بر حسب متر مربع و نیاز گرمایشی بر حسب متر مربع داشت. به منظور بررسی بهتر، پاسخ‌های بهینه از نظر عملکرد انرژی در هر مساحت به سه کلاس تقسیم‌بندی شد (شکل ۱).

همچنین یک بررسی تطبیقی بین بهترین عملکردهای انرژی در طول سه فرآیند بهینه‌سازی، انجام شد (شکل ۲). بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، مساحت زیربنای ساختمان، نسبت طول به عرض و حجم

ساختمان، مهم‌ترین عامل تشخیص داده شد. بر اساس یافته‌ها، افزایش کشیدگی شرقی-غربی ساختمان منجر به کاهش نیاز گرمایشی و افزایش کشیدگی شمالی-جنوبی ساختمان، منجر به بهبود عملکرد نور روز و کاهش نیاز سرمایشی ساختمان شد.

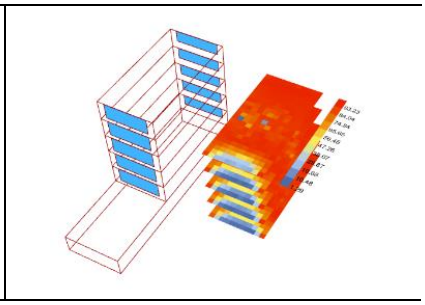
بر اساس برآیند عملکرد انرژی پاسخ‌ها، زیربنای ساختمان با فرم نزدیک به مربع با کشیدگی محدود شمالی-جنوبی منجر به عملکرد بهینه انرژی در ساختمان می‌شود. همچنین تحلیل یافته‌ها نشان داد که افزایش طول بلوک‌های شهری با کشیدگی شرقی-غربی می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی بر حسب متر مربع، موثر باشد. به طور کلی عملکرد انرژی بلوک‌های شهری با کشیدگی شرقی-غربی بهتر از بلوک‌های با کشیدگی شمالی-جنوبی بود. همچنین یافته‌ها نشان داد که افزایش تراکم عمودی، در کاهش مصرف انرژی کل بر حسب متر مربع، حایز اهمیت است. همچنین، در هر مساحت زیربنای مشخص آپارتمان‌های جنوبی، بهترین پاسخ‌های هر سه هدف عملکردی مربوط به ارتفاع فضاهای داخلی ۲/۶ متر بود. بنابراین کاهش ارتفاع فضاهای داخلی آپارتمان‌های مسکونی جنوبی، منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود. همچنین، در هر مساحت زیربنای مشخص آپارتمان‌های جنوبی، بهترین پاسخ‌های هر سه هدف عملکردی، به جز یک مورد، مربوط به زاویه صفر درجه نسبت به محور شمال بود. بنابراین، زاویه صفر درجه، بهترین جهت‌گیری ساختمان از نظر عملکرد انرژی بر مبنای مصرف انرژی کل، مصرف انرژی بر حسب متر مربع و شاخص نور مفید روز است. همچنین به طور کلی، مصرف انرژی کل واحد مسکونی و مصرف انرژی بر حسب متر مربع پس از زاویه صفر درجه در یک زاویه با جهت‌گیری منفی نسبت به همان زاویه با جهت‌گیری مثبت کمتر و بهینه‌تر بود.

بنابر آنچه گفته شد، اگر زیربنای ساختمان، با نسبت طول به عرض یک به یک با کشیدگی محدود شمالی-جنوبی و با جهت‌گیری صفر درجه نسبت به شمال باشد، در عین کاهش ارتفاع فضاهای داخلی منجر به بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان می‌شود. همچنین یافته‌ها نشان داد افزایش مساحت زیربنای ساختمان منجر به کاهش مصرف انرژی بر حسب متر مربع می‌شود.

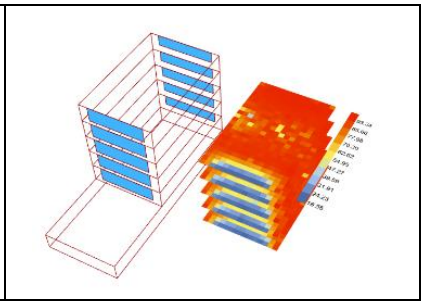


شکل ۱) مشخصات کلاس‌بندی‌شده پاسخ‌های مرز پارتو در سه آزمون بهینه‌سازی انجام‌شده

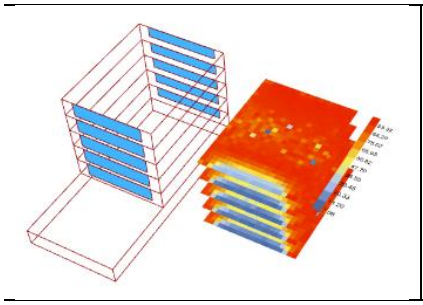
میانگین شاخص نور مفید روز



مساحت زیربنا: ۱۱۰ متر مربع
ابعاد زیربنا: ۷/٤ در ١٤/٨٦ متر
نسبت طول به عرض: ۰/٤۹
زاویه جهت‌گیری: صفر درجه
ارتفاع داخلی واحدها: ۲/٦ متر
نیاز سرمایشی: ۷۲/۸۳ کیلووات ساعت بر متر مربع
نیاز گرمایشی: ٦٥/۸۲ کیلووات ساعت بر متر مربع
میانگین نور مفید روز: ٪۸۲/۷٤

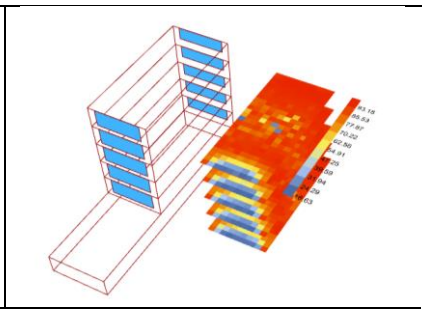


مساحت زیربنا: ١٦٠ متر مربع
ابعاد زیربنا: ۱۰/۲ در ۱۵/٦۸ متر
نسبت طول به عرض: ۰/٦٥
زاویه جهت‌گیری: صفر درجه
ارتفاع داخلی واحدها: ۲/٦ متر
نیاز سرمایشی: ٦٦/۰۸ کیلووات ساعت بر متر مربع
نیاز گرمایشی: ٥۰/٦٤ کیلووات ساعت بر متر مربع
میانگین نور مفید روز: ٪۸۲/۸۹

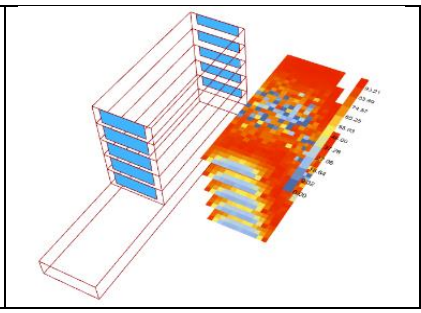


مساحت زیربنا: ۲۱۰متر مربع
ابعاد زیربنا: ۱۲/۸ در ١٦/٤۰ متر
نسبت طول به عرض: ۰/۷۸
زاویه جهت‌گیری: ٥- درجه
ارتفاع داخلی واحدها: ۲/٦ متر
نیاز سرمایشی: ٦۲/۲۳ کیلووات ساعت بر متر مربع
نیاز گرمایشی: ٤۲/٥۸ کیلووات ساعت بر متر مربع
میانگین نور مفید روز: ٪۸۲/۹۲

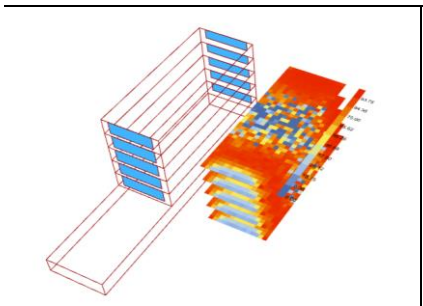
نیاز سرمایشی بر حسب متر مربع



مساحت زیربنا: ۱۱۰ متر مربع
ابعاد زیربنا: ۷ در ۱۵/۷۱ متر
نسبت طول به عرض: ۰/٤٤
زاویه جهت‌گیری: صفر درجه
ارتفاع داخلی واحدها: ۲/٦ متر
نیاز سرمایشی: ۷۲/٥۳ کیلووات ساعت بر متر مربع
نیاز گرمایشی: ٦۸/۸۲ کیلووات ساعت بر متر مربع
میانگین نور مفید روز: ٪۸۲/۰۷

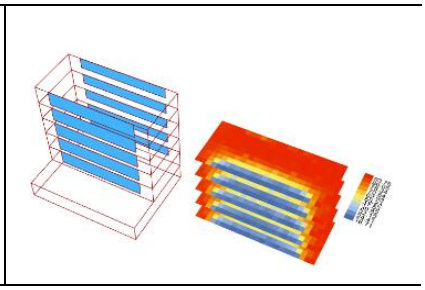


مساحت زیربنا: ١٦٠ متر مربع
ابعاد زیربنا: ۷/۸ در ۲۰/٥۱ متر
نسبت طول به عرض: ۰/۳۸
زاویه جهت‌گیری: صفر درجه
ارتفاع داخلی واحدها: ۲/٦ متر
نیاز سرمایشی: ٦٤/٥۸ کیلووات ساعت بر متر مربع
نیاز گرمایشی: ٦۲/۳٤ کیلووات ساعت بر متر مربع
میانگین نور مفید روز: ٪۷۳/۳٦

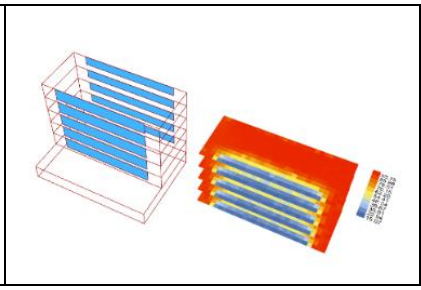


مساحت زیربنا: ۲۱۰متر مربع
ابعاد زیربنا: ۹ در ۲۳/۳۳ متر
نسبت طول به عرض: ۰/۳۸
زاویه جهت‌گیری: صفر درجه
ارتفاع داخلی واحدها: ۲/٦ متر
نیاز سرمایشی: ٥۹/۷۱ کیلووات ساعت بر متر مربع
نیاز گرمایشی: ٥٥/۱۸ کیلووات ساعت بر متر مربع
میانگین نور مفید روز: ٪٦۷/٦٥

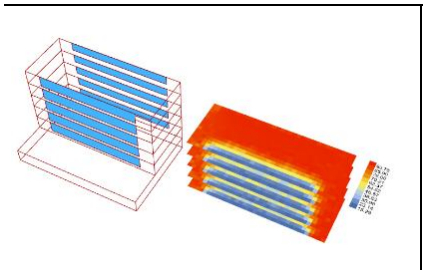
نیاز گرمایشی بر حسب متر مربع



مساحت زیربنا: ۱۱۰ متر مربع
ابعاد زیربنا: ۱۵/۷ در ۷ متر
نسبت طول به عرض: ۲/۲٤
زاویه جهت‌گیری: صفر درجه
ارتفاع داخلی واحدها: ۲/٦ متر
نیاز سرمایشی: ۷۲/۸۳ کیلووات ساعت بر متر مربع
نیاز گرمایشی: ٤٦/۱۷ کیلووات ساعت بر متر مربع
میانگین نور مفید روز: ٪۷٤/۹۸



مساحت زیربنا: ١٦٠ متر مربع
ابعاد زیربنا: ۱۹/٦ در ۸/١٦ متر
نسبت طول به عرض: ۲/٤۰
زاویه جهت‌گیری: صفر درجه
ارتفاع داخلی واحدها: ۲/٦ متر
نیاز سرمایشی: ۸۳/۰۸ کیلووات ساعت بر متر مربع
نیاز گرمایشی: ۳۸/۹۱ کیلووات ساعت بر متر مربع
میانگین نور مفید روز: ٪۷۷/۷۷



مساحت زیربنا: ۲۱۰متر مربع
ابعاد زیربنا: ۲۳ در ۹/۱۳ متر
نسبت طول به عرض: ۲/٥۱
زاویه جهت‌گیری: صفر درجه
ارتفاع داخلی واحدها: ۲/٦ متر
نیاز سرمایشی: ۷۷/۰٤ کیلووات ساعت بر متر مربع
نیاز گرمایشی: ۳٤/٥۷ کیلووات ساعت بر متر مربع
میانگین نور مفید روز: ٪۷۹/٥۱

شکل ۲) بهترین پاسخ‌های بهینه‌سازی‌های سه‌گانه بر مبنای سه هدف عملکردی انرژی

بحث

هدف این پژوهش مدل‌یابی رابطه بین مشخصات هندسی آپارتمان‌های مسکونی متداول و عملکرد انرژی آنها به منظور استفاده در برنامه‌ریزی‌های کلان این شهر بود. مشخصات هندسی آپارتمان‌های مسکونی، تاثیر قابل توجه و قابل پیش‌بینی بر مصرف انرژی ساختمان و به تبع آن بر مصرف جهانی انرژی داشت. نتایج پژوهش حاضر در معادله‌های به‌دست‌آمده در مدل‌یابی، سازگاری مطلوبی را با پژوهش *دینو* [Dino, 2016]، نشان داد. تفاوت پارامترهای پیش‌بینی در دو پژوهش، استفاده پژوهش حاضر از ابعاد ساختمان بر اساس جهت‌گیری و تغییر ساختار فرم بود. همچنین یافته‌ها، نشان از تاثیر حداکثر مساحت زیربنا بر عملکرد انرژی داشت این در حالی است که پژوهش *سوزا* و *السعدانی* [Souza & Alsaadani, 2012]، میزان کشیدگی شرقی-غربی را مهم‌ترین عامل معرفی می‌کند. دلیل این امر را می‌توان در تفاوت اقلیم دو پژوهش دانست. همچنین، در این پژوهش، تاثیر فضاهای داخلی بر عملکرد انرژی، در نظر گرفته نشده و این موضوع در تناقض با پژوهش *دینو* و *اوکلاک* [Dino & Ucoluk, 2017] است. اگرچه در پژوهش *دینو* و *اوکلاک* [Dino & Ucoluk, 2017] نیز، تاثیر تنوع مساحت زیربنا و حجم ساختمان مد نظر قرار نداشته است.

همچنین بر مبنای یافته‌ها، با ایجاد تغییرات در مشخصات هندسی ساختمان، می‌توان تا ۱۵۷ کیلووات ساعت بر متر مربع و حدود ۵۰٪ تغییر در مصرف انرژی بر حسب متر مربع سالانه ساختمان ایجاد کرد و این موضوع، سازگاری مطلوبی را با پژوهش *موسی* و *استیمر* [Musau & Steemers, 2008]، نشان می‌دهد. اما پژوهش *پویرازیس* و همکاران [Poirazis *et al.*, 2008]، امکان کاهش بیش از ۴۰٪ را میسر نمی‌داند. تفاوت مشخصات و اقلیم مورد ارزیابی در این پژوهش را می‌توان دلیل این موضوع دانست. همچنین تغییرات ویژگی‌های هندسی ایجادشده در این پژوهش، تغییر حدود ۸۵ کیلووات ساعت بر متر مربع و حدود ۶۲٪ در نیاز سرمایشی بر حسب متر مربع را نشان داد؛ که این نتایج با نتایج پژوهش *پویرازیس* [Poirazis *et al.*, 2008]، سازگاری دارد و با پژوهش *دینو* [Dino, 2017] و پژوهش *سوزا* و *السعدانی* [Souza & Alsaadani, 2012]، تناقض دارد. همچنین، تغییرات در عوامل هندسی ساختمان توانست نیاز گرمایشی بر حسب متر مربع را تا حدود ۷۲ کیلووات ساعت بر متر مربع و تا حدود ۷۱٪ بهبود ببخشد. در بین پژوهش‌ها، به عنوان بیشترین میزان، پژوهش *موسی* و *استیمر* [Musau & Steemers, 2008]، ۵۷٪ نیاز گرمایشی را بهبود بخشیده است؛ که میزانی بسیار کمتر از پژوهش حاضر است. به طور کلی، برای رسیدن به نتایج مذکور، بیش از ۱۱۰۰۰ شبیه‌سازی انجام شد. این عدد در قیاس با پژوهش‌های مشابه مطلوب است. به طور مثال، پژوهش *یی* [Yi, 2016]، به عنوان یکی از پژوهش‌های معتبر این حوزه، تعداد ۹۳۶ مدل را بررسی کرده است. همچنین پژوهش *دینو* و *اوکلاک* [Dino & Ucoluk, 2017]، تعداد ۷۲۰۰ مدل را ارزیابی کرده‌اند؛ که بیشترین میزان در بررسی‌های انجام شده است.

در این مسیر، این پژوهش، با محدودیت‌های زیادی روبه‌رو است. در این راستا، با توجه به تاثیر قابل توجه و قابل پیش‌بینی تعداد طبقات و مساحت زیربنای ساختمان، بر عملکرد انرژی، این دو عامل در همه فرآیندهای مدل‌یابی و بهینه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده‌اند. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود که در آینده، مدل‌یابی و بهینه‌سازی بر مبنای تغییرات تعداد طبقات و مساحت زیربنای ساختمان صورت پذیرد. در این راستا، بررسی آستانه‌های حداقل و حداکثر تغییرات تعداد طبقات و مساحت زیربنای ساختمان باید مد نظر قرار گیرد. همچنین در این پژوهش از سیستم تیرچه با بلوک پلی استارین بوده و دیوارهای با آجر سفالی به عنوان سیستم متداول شهر اصفهان برای تنظیم مصالح در شبیه‌سازی عملکرد انرژی استفاده شده و این موضوع نیز، از دیگر محدودیت‌های پژوهش بوده است. در این راستا، پیشنهاد می‌شود مدل‌یابی و بهینه‌سازی بر مبنای سیستم‌های دیگر ساختمانی مورد استفاده در شهر اصفهان نیز، صورت پذیرد.

نتیجه‌گیری

مشخصات هندسی مسکن آپارتمانی، تاثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی ساختمان و به تبع آن بر مصرف انرژی جهانی دارد. در راستا، در بین عوامل هندسی، مساحت زیربنای ساختمان، نسبت طول به عرض و حجم ساختمان، بیشترین تاثیر را بر عملکرد انرژی ساختمان مسکونی ۵ طبقه دارند و منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شوند. عامل ارتفاع فضاهای داخلی نیز از جمله عوامل موثر بر مصرف انرژی است؛ که کاهش آن منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تاییدیه اخلاقی: تاییدیه اخلاقی برای این مقاله دریافت نشده است.

تعارض منافع: این مقاله برگرفته از رساله دکتری آقای امید حیدری‌پور است.

سهم نویسندگان: امید حیدری‌پور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۵۰٪)؛ محمدصادق طاهر طلوع دل (نویسنده دوم)، روش‌شناس/نگارنده بحث (۵۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- Al-Shargabi AA, Almhafdy A, Ibrahim DM, Alghieth M, Chiclana F (2022). Buildings' energy consumption prediction models based on buildings' characteristics: Research trends, taxonomy, and performance measures. Journal of Building Engineering. 54:104577.
- Ali A, Jayaraman R, Azar E, Maalouf M (2024). A comparative analysis of machine learning and statistical methods for evaluating building performance: A systematic review and future benchmarking framework. Building and Environment. 252:111268.
- Asad Poor J, Goh Y W, Thorpe D (2021). A human-centric participatory approach to energy-efficient housing based on occupants' collaborative image. Open House International. 46(4):615-635.

- Chen Y, Guo M, Chen Z, Chen Z, Ji Y (2022). Physical energy and data-driven models in building energy prediction: A review. Energy Reports. 8:2656-2671.
- Chong A, Augenbroe G, Yan D (2021). Occupancy data at different spatial resolutions: Building energy performance and model calibration. Applied Energy. 286:116492.
- Coakley D, Raftery P, Keane M (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 37:123-141.
- Dino I. (2016). An evolutionary approach for 3D architectural space layout design exploration. Automation in construction. 69:131-150.
- Dino I G, Üçoluk G (2017). Multiobjective design optimization of building space layout, energy, and daylighting performance. Journal of Computing in Civil Engineering. 31(5):04017025.
- Ekici B, Cubukcuoglu C, Turrin M, Sariyildiz IS (2019). Performative computational architecture using swarm and evolutionary optimisation: A review. Building and Environment. 147:356-371.
- Elbeltagi E, Wefki H (2021). Predicting energy consumption for residential buildings using ANN through parametric modeling. Energy Reports. 7:2534-2545.
- Feng Z, Zhang M, Wei N, Zhao J, Zhang T, He X (2022). An office building energy consumption forecasting model with dynamically combined residual error correction based on the optimal model. Energy Reports. 8:12442-12455.
- Gao H, Koch C, Wu Y (2019). Building information modelling based building energy modelling: A review. Applied energy. 238:320-343.
- González-Torres M, Pérez-Lombard L, Coronel J F, Maestre I R, Yan D. (2022). A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. Energy Reports. 8:626-637.
- Jin X, Zhang C, Xiao F, Li A, Miller C (2023). A review and reflection on open datasets of city-level building energy use and their applications. Energy and Buildings. 285:112911.
- Kabir S, Islam RU, Hossain MS, Andersson K (2020). An integrated approach of belief rule base and deep learning to predict air pollution. Sensors. 20(7):1956.
- Liu H, Liang J, Liu Y, Wu H (2023). A review of data-driven building energy prediction. Buildings. 13(2):532.
- Liu K, Xu X, Zhang R, Kong L, Wang W, Deng W (2023). Impact of urban form on building energy consumption and solar energy potential: A case study of residential blocks in Jianhu, China. Energy and Buildings: 280:112727.
- Liu XH, Zhang DG, Yan HR, Cui YY, Chen L (2019). A new algorithm of the best path selection based on machine learning. IEEE Access. 7:126913-126928.
- Mousavi S, Villarreal-Marroquín MG, Hajiaghaei-Keshteli M, Smith NR (2023). Data-driven prediction and optimization toward net-zero and positive-energy buildings: A systematic review. Building and Environment. 242:110578.
- Musau F, Steemers K (2008). Space planning and energy efficiency in office buildings: the role of spatial and temporal diversity. Architectural Science Review. 51(2):133-145.
- Olu-Ajayi R, Alaka H, Sulaimon I, Balogun H, Wusu G, Yusuf W, et al (2023). Building energy performance prediction: A reliability analysis and evaluation of feature selection methods. Expert Systems with Applications. 225:120109.
- Olu-Ajayi R, Alaka H, Sulaimon I, Sunmola F, Ajayi S (2022). Machine learning for energy performance prediction at the design stage of buildings. Energy for Sustainable Development. 66:12-25.
- Pan Y, Zhu M, Lv Y, Yang Y, Liang Y, Yin R, et al (2023). Building energy simulation and its application for building performance optimization: A review of methods, tools, and case studies. Advances in Applied Energy. 10:100135.
- Poirazis H (2008). Single and double skin glazed office buildings. Division of Energy and Building Design [Report]. Lund: Lund University.
- Sariyildiz S (2012). Performative computational design. Proceedings of the ICONARCH-International Congress of Architecture and Technology; 2012 Nov 15-17. Konya: Selcuk University.
- Souza C, Alsaadani S (2012). Thermal zoning in speculative office buildings: discussing the connections between space layout and inside temperature control. Proceedings of the 1st Building Simulation and Optimization Conference; 2012; Loughborough University, England. Loughborough: IBPSA Publication.
- Wei S, Jones R, De Wilde P (2014). Driving factors for occupant-controlled space heating in residential buildings. Energy and Buildings. 70:36-44.
- Wei Y, Zhang X, Shi Y, Xia L, Pan S, Wu J, et al (2018). A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 82(1):1027-1047.
- Yi H (2016). User-driven automation for optimal thermal-zone layout during space programming phases. Architectural Science Review. 59(4):279-306.
- Zhang Y, Bai X, Mills FP, Pezzey JC (2018). Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: A review. Energy & Buildings. 172:279-294.
- Zhuang D, Zhang X, Lu Y, Wang C, Jin X, Zhou X, Shi X (2021). A performance data integrated BIM framework for building life-cycle energy efficiency and environmental optimization design. Automation in Construction. 127:103712.