ASPI | Afarand Scholarly Publishing Institute; Turkey
ISSN: 2538-4384; Geographical Researches. 2025;40(3):253-265 10.58209/geores.40.3.253

Water Performance Optimization of Typical Residential Apartments in Tehran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Hosseini Z.S.[1] *MSc*
Mofidi Shemirani S.M.[2]* *PhD*
Labib Zadeh R.[2] *PhD*

How to cite this article
Hosseini ZS, Mofidi Shemirani SM, Labib Zadeh R. Water Performance Optimization of Typical Residential Apartments in Tehran. Geographical Researches. 2025;40(3):253-265.

[1]Department of Architecture, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2]Department of Architecture and Urban Development, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

***Correspondence**
Address: Department of Architecture and Urban Development, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Shohadaye Hesarak Boulevard, Tehran, Iran. Postal Code: 14515/775
Phone: +98 (21) 44865154
s_m_mofidi@iust.ac.ir

Article History
Received: July 27, 2025
Accepted: September 17, 2025
ePublished: September 30, 2025

ABSTRACT

Aims The exponential increase in water consumption during the construction and operation phases of residential apartments in Tehran has led to critical water use conditions in the city. Accordingly, this study aims to optimize the geometrical characteristics of a typical residential apartment based on building water performance to inform urban-scale planning strategies.

Methodology The research method combines building water performance modeling and simulation with regression modeling and optimization analysis. The simulation tools include Python programming and the Ladybug Tools plugin within the Grasshopper visual programming environment. Two optimization processes were conducted, each with 9,000 models generated across 300 generations, resulting in a total of 18,000 simulations.

Findings Based on the dual optimization tests, the study achieved reductions of up to 53.98% in embodied water of construction materials, 56.76% in construction-phase water consumption 54.29% in operational water use, and 46.51% in mechanical systems water demand by altering spatial layout parameters of the apartment. The results indicate that east-west elongation of the residential unit on an equal building footprint, reduction of interior space area and height, placement of the vertical circulation core in the southeast, and positioning the living room on the west side with a north-south elongation significantly improve building water performance.

Conclusion The spatial layout characteristics of residential apartments, in a complex and multidimensional model, have a significant impact on building water performance and, consequently, national water consumption. The proposed generative design model can reduce more than 50% of residential apartment water consumption from material production to the operation phase, thereby contributing to environmental, economic, and social sustainability, as well as promoting sustainable urban development.

Keywords Water Performance Modeling; Water Performance Optimization; Residential Apartment; Building Embodied Water; Tehran

CITATION LINKS

[Abbasi *et al.*, 2025] Enviro-technical assessment of social responses to ...; [Ahmadi *et al.*, 2023] Generative design of housing spatial layout based ...; [Antão-Geraldes *et al.*, 2023] Promoting water efficiency in a municipal market ...; [Ataman & Dino, 2022] Performative design processes in architectural practices in Turkey ...; [Borah, 2025] Urban water stress: Climate change implications ...; [Deb *et al.*, 2002] A fast and elitist multiobjective genetic algorithm ... [Deslatte *et al.*, 2025] Embracing the ambiguity: Tracing climate response diversity ...; [Dino, 2016] An evolutionary approach for 3D architectural space ...; [Dino & Üçoluk, 2017] Multiobjective design optimization of building space layout ...; [Ekici *et al.*, 2019] Performative computational architecture using swarm ...; [Fattahi Tabasi *et al.*, 2023] Optimizing urban layouts through computational generative design ...; [Guo *et al.*, 2017] Water-stable in (III)-based metal-organic frameworks ...; [He *et al.*, 2021] Future global urban water scarcity and potential ...; [Hosseinian & Ghahari, 2021] The relationship between structural parameters and water footprint ...; [Hosseinian *et al.*, 2023] Sustainable production of buildings based on Iranian ...; [Kamazani *et al.*, 2024] Interdependencies and tradeoffs in embodied and operational ...; [Keshavarzi & Rahmani-Asl, 2021] Genfloor: Interactive generative space layout system ...; [Li *et al.*, 2024] Automated architectural space layout planning using ...; [Liu & Zhou, 2025] LayoutGAN for automated layout design in graphic design ...; [Liu *et al.*, 2019] A building information modelling (BIM) based water ...; [Pradeep *et al.*, 2024] Managing water, the mother of resources ...; [Rahbar *et al.*, 2022] Architectural layout design through deep learning and ...; [Saemian *et al.*, 2022] How much water did Iran lose over the ...; [Sharma & Chani, 2024] Embodied water-energy nexus towards sustainable building construction ...; [Su *et al.*, 2024] Floor plan graph learning for generative design of residential buildings ...; [Thebuwena *et al.*, 2024] On the necessity for improving water efficiency in commercial ...; [Wang *et al.*, 2025] A graph-enabled parametric modeling approach for façade ...; [Xia *et al.*, 2024] Interactive AI for generative housing design based on graph neural networks ...; [Yan *et al.*, 2025] Generative design for architectural spatial layouts: A review ...; [Yi, 2016] User-driven automation for optimal thermal-zone layout during ...; [Yong & Chibiao, 2022] A generative design method of building layout generated ...; [Zhang *et al.*, 2021] Generative design and performance optimization of residential ...;

Copyright© 2025, 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.

بهینه‌سازی عملکرد آب آپارتمان‌های مسکونی متداول شهر تهران

زکیه‌سادات حسینی MSc
گروه معماری، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
سیدمجید مفیدی شمیرانی* PhD
گروه معماری و شهرسازی، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
راضیه لبیب‌زاده PhD
گروه معماری و شهرسازی، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

اهداف: افزایش تصاعدی مصرف آب در مراحل ساخت‌وساز و بهره‌برداری آپارتمان‌های مسکونی در شهر تهران، منجر به شرایط بحرانی مصرف آب در این شهر شده است. هدف این پژوهش، بهینه‌سازی مشخصات هندسی آپارتمان مسکونی بر مبنای عملکرد آب ساختمان جهت استفاده در برنامه‌ریزی‌های کلان این شهر است.

روش‌شناسی: روش پژوهش شامل مدل‌سازی و شبیه‌سازی عملکرد آب و روش تجزیه و تحلیل، مدل‌یابی و بهینه‌سازی است. ابزار شبیه‌سازی، زبان برنامه‌نویسی پایتون و پلاگین لیدی‌باگ‌تولز، تحت محیط بصری گراس‌هاپر بود. در این پژوهش، دو فرآیند بهینه‌سازی انجام شده و تعداد نمونه در هر بهینه‌سازی ۹۰۰۰ مدل در قالب ۳۰۰ نسل بود.

یافته‌ها: بر مبنای دو آزمون بهینه‌سازی، این پژوهش تا ۵۳/۹۸٪ مصرف آب نهفته مصالح، ۵۶/۷۶٪ مصرف آب ساخت‌وساز، ۵۴/۲۹٪ مصرف آب عملیاتی و ۴۶/۵۱٪ مصرف آب تاسیسات مکانیکی را بر مبنای تغییر در پارامترهای پیکربندی فضایی مسکن آپارتمانی به همراه داشت. کشیدگی شرقی-غربی آپارتمان مسکونی در یک مساحت زیربنای مساوی، کاهش مساحت و ارتفاع فضاهای داخلی، جانمایی فضای ارتباط عمودی در جنوب شرقی و جانمایی فضای پذیرایی در غرب با کشیدگی شمالی-جنوبی منجر به بهبود عملکرد آب ساختمان شد.

نتیجه‌گیری: مشخصات پیکربندی مسکن آپارتمانی در یک مدل پیچیده و چندوجهی، تاثیر قابل توجهی بر عملکرد آب ساختمان و به تبع آن بر مصرف آب کشور دارد. مدل طراحی مولد پژوهش می‌تواند بیش از ۵۰٪ مصرف آب آپارتمان‌های مسکونی را از تولید مصالح تا زمان بهره‌برداری کاهش دهند و منجر به توسعه پایدار شود.

کلیدواژگان: شبیه‌سازی عملکرد آب، مدل‌یابی عملکرد آب، بهینه‌سازی عملکرد آب، آپارتمان مسکونی، آب نهفته ساختمان، شهر تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶
*نویسنده مسئول: s_m_mofidi@iust.ac.ir

مقدمه

بحران آب، توسط مجمع جهانی اقتصاد به عنوان یکی از بزرگ‌ترین خطرات جهانی ذکر شده‌است [Borah, 2025]. بیش از نیمی از کلانشهرهای جهان با مشکل کم‌آبی روبه‌رو هستند [Thebuwena *et al.*, 2024; He *et al.*, 2021]. همچنین حدود ۴۰٪ از جمعیت جهان، به طور مستقیم در مناطقی با کمبود آب زندگی می‌کنند [Pradeep *et al.*, 2024; Sharma & Chani, 2024]. بر این اساس، در تمامی کشورهای جهان، نیاز به مدیریت آب به عنوان یک مساله ضروری احساس می‌گردد. کمبود منابع آب دیگر تنها به عنوان یک چالش برای رشد انسانی و پایداری زیست‌محیطی مطرح نیست؛ بلکه به عنوان یک مساله سیاسی و امنیتی هم مورد توجه قرار می‌گیرد [Deslatte *et al.*, 2025; Thebuwena *et al.*, 2024]. این مساله برای کشور کم‌آبی مانند ایران که بیشترین تقاضای آب را برای آینده دارد و سومین کشور کم‌آب در میان ۲۲ کشور مشابه در خاورمیانه و شمال آفریقا است، اهمیت بسیار بیشتری دارد [Abbasi *et al.*, 2025]. ایران به دلیل استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی از طریق احداث چاه‌های آب برای مصارف کشاورزی و صنعتی و همچنین قرار گرفتن کشور در اقلیم گرم و خشک، و کم‌بودن میزان بار و تبخیر آن، ایران را با بحران جدی کم‌آبی روبه‌رو کرده است [Saemian *et al.*, 2022]. با توجه به سهم قابل توجه بخش ساختمان در مصرف آب در شهر تهران، افزایش جمعیت و به تبع آن، افزایش ساخت‌وساز در کنار سیاست‌گذاری‌های نادرست در زمینه آب منجر به بزرگ‌ترین بحران کمبود آب به صورت جدی شده است [Hosseinian & Ghahari, 2021]. ساختمان‌ها به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌های منابع طبیعی، به‌تنهایی حدود ۳۰٪ تا ۴۰٪ از منابع آب شیرین جهان را مصرف می‌کنند [Antão-Geraldes *et al.*, 2023; Hosseinian *et al.*, 2023]. در این میان، آپارتمان‌های مسکونی، به عنوان بزرگ‌ترین بخش ساختمان‌سازی، دارای اهمیت بیشتری است و سهم قابل توجهی در مصرف آب ساختمان دارد. به همین دلیل، کاربری مورد نظر پژوهش، آپارتمان مسکونی میان‌مرتبه در شهر تهران است.

کاهش آب مصرفی در چرخه عمر ساختمان می‌تواند اثرات منفی زیست‌محیطی آن را کاهش داده و به پایداری بیشتر منابع کمک کند [Kamazani *et al.*, 2024]. با این حال، دستیابی به این هدف نیازمند تحلیل دقیق اجزای مختلف مصرف آب و ارزیابی ارتباط بین آنها است تا استراتژی‌های موثری برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی طراحی شود [Sharma & Chani, 2024]. از این رو به نظر می‌رسد بتوان با استفاده از استراتژی‌ها و فنّاوری‌های ساختمان‌های سبز به کاهش تقاضای آب در تولید فرآیند ساخت و بهره‌برداری ساختمان رسید. در این میان یکی از این استراتژی‌ها برای حمایت از طراحی و ساخت‌وساز سبز استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) است [Liu *et al.*, 2019]. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، بر مبنای رویکردهای مختلفی مد نظر قرار می‌گیرد. یکی از رویکردهای هوشمند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، که امروزه بسیار مورد توجه طراحان قرار می‌گیرد، طراحی مولد (GD) است [Wang *et al.*, 2025; Ekici *et al.*, 2019]. به طور کلی رویکرد طراحی مولد قابلیت آن را دارد که با الگوریتم‌های ارزیابی اهداف عملکردی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی ادغام شود و همه وجوه محیط طراحی را برای راه حل‌هایی مطابق با الزامات عملکردی جست‌وجو کند و پاسخ‌های بهینه را تعریف کند [Su *et al.*, 2024; Ataman & Dino,

[2022]. در این میان، یکی از سازوکارهای جدید در بین پژوهشگران که می‌تواند به صورت پویا، مشخصات ساختمان را مدل‌سازی و عملکرد ساختمان را شبیه‌سازی کند، طراحی مولد پیکربندی‌های فضایی (GSL) است [Li *et al.*, 2024; Xia *et al.*, 2024; Ahmadi *et al.*, 2023] که به عنوان راهکاری نوین برای بهینه‌سازی مصرف منابع در ساختمان‌ها ارایه می‌شود [Fattahi Tabasi *et al.*, 2023; Yong & Chibiao, 2022]. به طور کلی، مفهوم پیکربندی فضایی، به جانمایی و چیدمان فضاهای داخلی اطلاق می‌شود و در مرحله طراحی مفهومی مد نظر قرار می‌گیرد [Yi, 2016; Dino, 2016; Dino & Üçoluk, 2017]. براساس بررسی ادبیات موضوعی، طراحی مولد پیکربندی‌های فضایی مبتنی بر بهینه‌سازی عملکرد آب ساختمان، هنوز در هیچ پژوهشی مورد مطالعه قرار نگرفته است و تمرکز بر این موضوع می‌تواند بستری برای پژوهش‌های آینده فراهم کند.

براساس بررسی‌ها، این سازوکار قادر است با تحلیل مولفه‌های آب نهفته، آب ساخت‌وساز و آب عملیاتی، پیکربندی‌های فضایی آپارتمان مسکونی بهینه را برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ارایه دهد [Liu & Zhou, 2025; Guo *et al.*, 2017]. همچنین، سازوکار طراحی مولد پیکربندی فضایی قابلیت آن را دارد که در ترکیب با الگوریتم‌های تکاملی میزان پارامترهای پیکربندی‌های فضایی آپارتمان مسکونی را در اهداف کاملاً متناقض، جست‌وجو و بهینه‌یابی کرد [Yan *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2021]. بر این اساس، با توجه به تاثیرات گسترده مصرف آب در ساختمان‌ها و نیاز به راهکارهای پایدار، این پژوهش از طریق طراحی مولد پیکربندی فضایی آپارتمان مسکونی، با هدف ارایه رویکردی برای طراحی بهینه پیکربندی‌های فضایی، به بررسی و بهبود عملکرد زیست‌محیطی ساختمان‌ها از طریق کاهش مصرف منابع آب ساختمان می‌پردازد. بر این اساس، در این پژوهش به بهینه‌سازی مصرف آب نهفته، ساخت‌وساز و عملیاتی بر مبنای مولفه‌های کالبدی آپارتمان مسکونی میان‌مرتبه پایدار در اقلیم شهر تهران و با به‌کارگیری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در قالب رویکرد طراحی مولد پیکربندی فضایی آپارتمان مسکونی پرداخته شد.

روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نوع کمّی بوده و در سال ۱۴۰۴ در شهر تهران انجام شد. روش انجام این پژوهش مشتمل بر مدل‌یابی رگرسیونی عملکرد آب، کدنویسی تولید خودکار پیکربندی فضایی بر مبنای جانمایی فضاها، شبیه‌سازی عملکرد آب و بهینه‌سازی در محیط برنامه‌نویسی گراس‌هاپر و زبان برنامه‌نویسی پایتون در نرم‌افزار راینو ورژن ۸ و کاربری فضای هدف واحد مسکونی در آپارتمان مسکونی بود. جمعیت آماری این مطالعه آپارتمان مسکونی متداول شهر تهران بود. آپارتمان‌های مسکونی نمونه برای مدل‌یابی عملکرد آب بر مبنای سه شرط انتخاب شدند: ۱) در شهر تهران و در مقیاس میان‌مرتبه باشند؛ ۲) دارای اطلاعات کامل شامل نقشه‌ها، زمان‌بندی ساخت‌وساز، میزان آب مصرفی ساخت‌وساز و مصالح مورد استفاده باشند؛ ۳) در حال حاضر، حداقل یک سال مورد استفاده قرار گرفته باشند و اطلاعات شامل میزان آب مصرفی ساکنین در طول یک سال و تعداد ساکنین قابل دسترسی باشد. در صورت تامین این شرایط، نمونه‌ها امکان استفاده در مدل‌یابی عملکرد آب ساختمان را داشتند. با توجه به اینکه ساختمان‌های کمی در شهر تهران وجود دارد، که دارای این شرایط باشند، نمونه‌گیری به صورت هدفمند انجام شد؛ به طوری که در طول یک سال در دو بازه شش‌ماهه، هر نمونه‌ای که دارای اطلاعات مورد نظر بود، مورد بررسی قرار گرفت و در صورت تامین کامل شرایط، در مجموعه نمونه‌ها قرار گرفت. در نهایت بر مبنای محدودیت‌های پیمایش میدانی، ۶۴ نمونه آپارتمان مسکونی انتخاب شد.

همچنین، بر پایه نتایج مرکز آمار ایران و سازمان نظام مهندسی، آپارتمان‌های مسکونی ۱۵۰ متر مربعی در چهار طبقه روی پیلوت به عنوان تیپ متداول آپارتمان‌های مسکونی شهر تهران شناخته شدند. تعداد طبقات و زیربنای آپارتمان در نمونه‌ها به دلیل تاثیر زیاد و قابل پیش‌بینی این پارامتر بر عملکرد آب ساختمان ثابت نگه داشته شدند. در این بخش، نمونه‌گیری به صورت تصادفی بر مبنای الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط دو (NSGA-II) انجام شد و تعداد نمونه‌ها در هر فرآیند بهینه‌سازی براساس پیشنهاد طراح الگوریتم [Deb *et al.*, 2002]، ۹۰۰۰ مدل فیزیکی ساختمان در قالب ۳۰۰ نسل و جمعیت ۳۰ عدد در هر نسل بود. ابزارهای پژوهش، در فرآیند مدل‌یابی رگرسیونی، نرم‌افزار SPSS ورژن ۲۷؛ در مدل‌سازی و شبیه‌سازی، زبان برنامه‌نویسی پایتون در محیط کدنویسی بصری گراس‌هاپر در نرم‌افزار راینو و با استفاده از از پلاگین لیدی‌باگ‌تولز وزن ۱/۸؛ در فرآیند بهینه‌سازی، پلاگین کولیبری و والیسی ورژن ۲/۷ تحت محیط کدنویسی بصری گراس‌هاپر در نرم‌افزار راینو و در فرآیند مدل‌یابی رگرسیونی، نرم‌افزار SPSS بود.

بر این اساس، در مرحله اول، مدل‌یابی عملکرد آب در آپارتمان‌های مسکونی مد نظر قرار گرفت. در این راستا، از آزمون رگرسیون برای مدل‌یابی استفاده شد. مدل‌یابی عملکرد آب در آپارتمان‌های مسکونی بر مبنای مشخصات کلی آپارتمان شامل طول دیوارهای خارجی، مساحت دیوارهای خارجی، طول دیوارهای داخلی، مساحت دیوارهای داخلی، مساحت سقف تیرچه بلوک، مساحت سقف عرضه فولادی، مساحت فونداسیون کف، تعداد روز ساخت‌وساز، تعداد کارگرها در هر روز و تعداد ساکنین ساختمان مورد توجه قرار گرفت. در ابتدا، به منظور بررسی رابطه یک به یک عملکرد آب در آپارتمان‌های مسکونی و هر یک از مشخصات کلی ساختمان، از آزمون رگرسیون انحنایی استفاده شد. سپس، آزمون رگرسیون غیرخطی براساس روابط احتمالی بین مصرف آب عملیاتی به ازای هر سال و مصرف آب طول فرآیند ساخت‌وساز و مشخصات کلی ساختمان انجام شد. برای این منظور از بین مشخصات کلی ساختمان، اطلاعاتی که در ارتباط با مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان است بر مبنای ادبیات موضوعی انتخاب شدند.

بخش دوم پژوهش، کدنویسی خودکار تولید پیکربندی فضایی آپارتمان مسکونی بود که به مرحله برنامه‌ریزی فضاها اختصاص دارد. در این بخش، از کدنویسی در محیط برنامه‌نویسی گراس‌هاپر و زبان برنامه‌نویسی پایتون برای آماده‌سازی الگوریتم طراحی مولد پیکربندی فضایی آپارتمان مسکونی متداول استفاده شد و به منظور تولید از رویکرد ناحیه محور استفاده شد. الگوریتم طراحی مولد آپارتمان مسکونی برای تولید پیکربندی فضاهای داخلی مسکونی با مساحت زیربنای مشخص، با درنظرگرفتن مرز مشخص مستطیلی زیربنا تعریف می‌شود. ژن‌های اصلی ورودی الگوریتم، مساحت و ابعاد یکی از اضلاع قطعه زمین هستند. سپس الگوریتم بر مبنای این دو عدد و بر مبنای قانون ۶۰٪ ساخت شهرداری تهران، زیربنای ساختمان را تشخیص می‌دهد. در ادامه بر مبنای مساحت زیربنای ساختمان و برای تبیین ابعاد فضاهای داخلی ساختمان کدنویسی انجام می‌شود. برای این منظور، فرض اولیه، شکل‌گیری همه فضاهای داخلی به جز فضایی پذیرایی با فرم مستطیل و بر مبنای یک طول و یک عرض مشخص در نظر گرفته شد. محدوده ابعاد فضاهای متداول آپارتمان‌های مسکونی متداول شهر تهران براساس پیمایش میدانی به‌دست آمد.

این فضاها، شامل فضای ارتباط عمودی، فضای پذیرایی، آشپزخانه، سرویس بهداشتی، اتاق خواب اصلی، اتاق خواب دوم و حمام است. برای تبیین ابعاد هر یک از این فضا، شش مجموعه ژن ورودی شامل مساحت‌های استاندارد هر یک از فضاها، مساحت حداقل هر یک از فضاها براساس پیمایش میدانی، مساحت حداکثر هر یک از فضاها براساس پیمایش میدانی، میزان مساحت هر فضا، ابعاد ضلع استاندارد هر یک از فضاها و میزان ابعاد ضلع ورودی فضاها برای الگوریتم لازم است. در ادامه بر مبنای انتخاب مساحت هر فضا و تعریف طول یکی از اضلاع آن فضا، محدوده و شکل فضا قابل ترسیم است. بر همین اساس، ابتدا مستطیل محدوده هر فضا، از طریق یک چرخه با استفاده از مساحت و طول انتخابی بر روی نقطه صفر مختصات تعریف می‌شود.

در ادامه فرآیند، کدنویسی جانمایی فضاهای ترسیم‌شده در محدوده زیربنای آپارتمان مسکونی بر مبنای رویکرد ناحیه‌محور در طراحی مولد پیکربندی فضایی مد نظر قرار داشت. در این رویکرد، از شروط همپوشانی ناحیه‌های هر یک از فضاهای داخلی با محدوده زیربنا استفاده می‌شود. در این پژوهش، ایده جانمایی براساس قرارگیری مستطیل فضاها در محدوده مستطیل زیربنای آپارتمان مسکونی از طریق جابه‌جایی مستطیل هر فضا، از یکی از رئوس مستطیل هر فضا به یکی از رئوس زیربنای آپارتمان مسکونی مد نظر بود. برای این منظور، ابتدا فضای ارتباط عمودی، در زیربنای آپارتمان مسکونی با شرط مجاورت در کنار دیوارهای خارجی بنا جانمایی شد. برای این منظور، دو ژن ورودی شامل شاخص جهت‌گیری فضای ارتباط عمودی و شاخص موقعیت فضای ارتباط عمودی مد نظر قرار داشت. شاخص جهت‌گیری فضای ارتباط عمودی نشان داد که فضای ارتباط عمودی در کدام جبهه ساختمان شامل شمال، شرق، جنوب و غرب قرار می‌گیرد. این ژن شامل عدد ۰ تا ۳ بود که نشان‌دهنده جهات شمال، شرق، جنوب و غرب است. در ادامه چرخه‌ای مبتنی بر فضاهای داخلی، به غیر از پذیرایی شروع شده و همه فضاها در زیربنا جانمایی شدند. فرآیند قرارگیری فضاها در کنار هم تا جانمایی همه فضاها در کنار هم ادامه پیدا کرد. در نهایت، فضای باقی‌مانده زیربنای آپارتمان مسکونی با هر شکلی، تعیین‌کننده فضای پذیرایی و مسیرهای ارتباط بین فضاها شد. بر این اساس، همه فضاها با فرم مستطیل و فضای پذیرایی با فرم متنوع شکل می‌گیرد. در نهایت، خروجی الگوریتم، پیکربندی دوبُعدی واحدهای مسکونی به صورت تعریف مجموعه‌ای از اشکال بسته است. 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.

در ادامه، بر مبنای مدل‌های عملکرد آب و الگوریتم تولید خودکار پیکربندی، الگوریتم شبیه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان ساخته شد. برای تعریف الگوریتم شبیه‌سازی عملکرد آب از داده‌های به‌دست‌آمده آب نهفته بر مبنای استانداردها و پژوهش‌های این حوزه و از نتایج مدل‌یابی عملکرد آب بر مبنای پیمایش انجام شده استفاده شد. برای این منظور، چهار الگوریتم مجزا برای مصرف آب نهفته مصالح ساختمان، مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان، مصرف آب عملیاتی ساختمان و مصرف آب تاسیسات مکانیکی ساختمان کدنویسی شد. برای شبیه‌سازی مصرف آب نهفته مصالح ساختمان بر مبنای پایگاه داده‌های آب نهفته مصالح جمع‌آوری شده، الگوریتمی نوشته شده و بر مبنای مشخصات مدل، میزان آب نفهته کل نیز به عنوان خروجی به‌دست آمد. در ادامه فرآیند، محاسبه آب ساخت‌وساز و آب عملیاتی ساختمان بر مبنای مدل به‌دست‌آمده از نتیجه مدل‌یابی رگرسیون غیرخطی آب ساخت‌وساز و آب عملیاتی ساختمان در فرآیند کدنویسی مد نظر قرار گرفت. همچنین، کدنویسی آب تاسیسات مکانیکی بر مبنای شبیه‌سازی عملکرد انرژی در افزونه لیدی‌باگ‌تولز انجام شد. برای این منظور، برنامه‌های زمان‌بندی در الگوریتم شبیه‌سازی عملکرد آب ساختمان، بر مبنای استاندارد اشرای (ASHRAE 90.1 2019)، براساس برنامه زمان‌بندی آپارتمان مسکونی میان مرتبه (Midrise Apartment) و زیرگروه آپارتمان تعریف شد.

در مرحله بعدی، اعتبارسنجی پاسخ‌های الگوریتم شبیه‌سازی عملکرد آب ساختمان انجام شد. به منظور اعتبارسنجی، نتایج مصرف واقعی ۶۴ آپارتمان مسکونی انتخاب‌شده در پیمایش میدانی شهر تهران با نتایج شبیه‌سازی‌شده در الگوریتم پژوهش، از طریق بررسی آزمون همبستگی پیرسون مقایسه شد. برای این منظور، ابتدا داده‌های شبیه‌سازی براساس ابزار کولیبری و بر مبنای گام‌بندی انجام‌شده، گردآوری شده و سپس با استفاده از ابزار SPSS و از طریق آزمون همبستگی پیرسون اعتبارسنجی تکمیل شد.

همچنین در مرحله بعدی، بهینه‌سازی عملکرد آب ساختمان برای

آپارتمان مسکونی ۱۵۰ متر مربعی در چهار طبقه روی پیلوت بر مبنای الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب دو انجام شد. در این بخش، دو فرآیند بهینه‌سازی مجزا، مد نظر قرار داشت؛ به طوری که در فرآیند بهینه‌سازی شماره یک، سه هدف عملکردی شامل مصرف آب نهفته مصالح ساختمان، مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان و مصرف آب عملیاتی ساختمان و در فرآیند بهینه‌سازی شماره دو، چهار هدف عملکردی شامل مصرف آب نهفته مصالح ساختمان، مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان، مصرف آب عملیاتی ساختمان و مصرف آب تاسیسات مکانیکی ساختمان مد نظر قرار داشت.

یافته‌ها

ابتدا به منظور مدل‌یابی عملکرد آب، مشخصات کلی ساختمان، اطلاعات ساخت‌وساز، اطلاعات مربوط به ساکنین و میزان مصرف آب در دو بخش ساخت‌وساز و عملیاتی برای ۶۴ نمونه آپارتمان مسکونی استخراج شد و مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله اول، آمار توصیفی عملکرد آب آپارتمان‌های مسکونی و مشخصات کلی ساختمان ارایه شد (جدول ۱). یافته‌ها نشان داد که بر مبنای ۶۴ نمونه مورد بررسی، به طور میانگین مصرف آب ساخت‌وساز حدود ۳۳/۳٪ بیش از مصرف آب عملیاتی به ازای هر سال بود.

جدول ۱) آمار توصیفی عملکرد آب آپارتمان‌های مسکونی و مشخصات کلی ساختمان

مشخصات	حداقل	حداکثر	میانه	میانگین	واریانس
طول دیوارهای خارجی	۳۶/۰۰	۶۶/۰۰	۴۷/۵۹	۴۷/۵۹±۷/۸۱	۶۱/۰۱
مساحت دیوارهای خارجی	۱۰۸/۰۰	۱۹۸/۰۰	۱۴۲/۷۸	۱۴۲/۷۸±۲۳/۴۳	۵۴۹/۰۶
طول دیوارهای داخلی	۱۶/۵۰	۳۰/۰۰	۲۱/۹۷	۲۱/۹۷±۳/۹۵	۱۵/۵۷
مساحت دیوارهای داخلی	۴۹/۵۰	۹۰/۰۰	۶۵/۹۱	۶۵/۹۱±۱۱/۸۴	۱۴۰/۱۳
مساحت سقف تیرچه بلوک	۰	۱۶۰۹/۵۰	۴۹۹/۵۰	۴۹۹/۵±۵۲۸/۹۲	۲۷۹۷۵۹/۱۴
مساحت سقف عرضه فولادی	۰	۹۳۶/۰۰	۲۸۶/۱۹	۲۸۶/۱۹±۳۷۲/۷۲	۱۳۸۹۱۸/۶۳
مساحت فونداسیون کف	۸۰/۰۰	۲۶۸/۲۵	۱۴۳/۲۸	۱۴۳/۲۸±۴۸/۴۴	۲۳۴۶/۴۷
تعداد روز ساخت‌وساز	۲۱۰/۰۰	۱۴۲۵/۰۰	۴۵۴/۸۱	۴۵۴/۸۱±۲۸۳/۷	۸۰۵۰۵/۶۸
تعداد کارگرها در هر روز	۵/۰۰	۱۶/۰۰	۱۱/۵۶	۱۱/۵۶±۳/۰۲	۹/۱۴
تعداد ساکنین	۵/۰۰	۲۵/۰۰	۱۴/۸۸	۱۴/۸۸±۶/۴۸	۴۲/۰۲
مصرف آب ساخت‌وساز	۱۷۵۰۰۰	۱۲۰۹۰۰۰	۵۴۱۵۰۰	۵۴۱۵۰۰±۲۶۵۷۷۴/۹۴	۷۰۶۳۶۳۱۷۴۶۰/۳۲
مصرف آب عملیاتی به ازای هر سال	۲۱۰۵۷۶/۹۲	۱۶۶۲۷۷۷/۷۷	۸۱۳۹۶۳/۷۱	۸۱۳۹۶۳/۷۱±۹۲۲۳۳/۷۲	۱۵۰۶۹۵۱۱۷۰۳۳/۰۶

در ادامه، مدل‌یابی مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان مبتنی بر مشخصات کلی ساختمان مد نظر قرار گرفت. در این راستا، ابتدا آزمون رگرسیون انحنایی بین مصرف آب ساخت‌وساز و آب عملیاتی ساختمان و مشخصات کلی ساختمان مد نظر قرار گرفت. براساس یافته‌های رگرسیون انحنایی و به منظور رسیدن به مدل‌هایی با ضریب دقت بیشتر، مدل غیرخطی مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان مبتنی بر مشخصات کلی ساختمان به شرح زیر تعریف شد و مورد ارزیابی قرار گرفت:

$$\begin{aligned} BCW = a &+ (b \times EWA) + (c \times EWA^2) \\ &+ (d \times EWA^3) + (e \times IWA) \\ &+ (f \times IWA^2) + (h \times BBA) \\ &+ (i \times BBA^2) + (j \times BBA^3) \\ &+ (k \times SDA) + (m \times SDA^2) \\ &+ (n \times SDA^3) + (o \times GFA) \\ &+ (p \times GFA^2) + (r \times BWN) \\ &+ (g \times BWN^3) + (s \times CDN) \\ &+ (t \times CDN^2) + (v \times CDN^3) \end{aligned}$$

براساس نتایج آزمون رگرسیون، معادله غیرخطی مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان (BCW)، بر مبنای مساحت دیوارهای خارجی (EWA)، مساحت دیوارهای داخلی (IWA)، مساحت سقف تیرچه و بلوک (BBA)، مساحت سقف عرشه فولادی (SDA)، مساحت فونداسیون کف ساختمان (GFA)، تعداد روز ساخت‌وساز (CDN) و تعداد کارگرها در هر روز (BWN) انجام شد. ضرایب معادله شامل یک عدد ثابت (a) به عنوان مقدار پایه مدل بوده و سایر ضرایب به متغیرهای هندسی و سازه‌ای ساختمان مربوط می‌شوند. ضرایب b، c و d به‌ترتیب بیانگر اثرات خطی، درجه دوم و درجه سوم مساحت دیوارهای خارجی (EWA) هستند، در حالی که ضرایب e و f اثرات خطی و درجه دوم مساحت دیوارهای داخلی (IWA) را نشان می‌دهند. ضرایب g، h و i به‌ترتیب اثرات مرتبه اول، دوم و سوم مساحت سقف تیرچه و بلوک (BBA) را تبیین می‌کنند. همچنین ضرایب j، k و m بیانگر اثرات خطی، درجه دوم و درجه سوم مساحت سقف عرشه فولادی (SDA) هستند. ضرایب n و o اثرات خطی و درجه دوم مساحت فونداسیون کف ساختمان (GFA) را توصیف می‌کنند. علاوه بر این، ضرایب p و r به‌ترتیب نشان‌دهنده اثرات مرتبه اول و دوم تعداد کارگران در هر روز (BWN) هستند.

در نهایت، ضرایب s، t و v اثرات خطی، درجه دوم و درجه سوم تعداد روزهای ساخت‌وساز (CDN) را بیان می‌کنند. این مجموعه ضرایب در کنار یکدیگر میزان تاثیر هر یک از متغیرهای سازه‌ای و اجرایی را بر عملکرد پیش‌بینی مدل مشخص می‌سازند. فرآیند آزمون رگرسیون در ۲۲۱ دوره انجام شده و براساس نتایج آزمون، میزان آر اسکوار ۰/۹۸۶ به‌دست آمد. بر مبنای آزمون انجام‌شده، عدد شروع برای همه ضرایب معادله در فرآیند بهینه‌سازی، روی عدد صفر تنظیم شد (جدول ۲).

جدول ۲) نتایج آزمون رگرسیون غیرخطی بین مصرف انرژی کل واحد مسکونی با عوامل کالبدی ساختمان

ضریب معادله	ضریب تخمینی	خطای استاندارد	۹۵٪ فاصله اطمینان	
			حداقل ضریب	حداکثر ضریب
a	۲۹۶۶/۷۵۴×۱۰^۳	۲۲۲۶/۵۱۶	۲۹۶۲.۲۷۰×۱۰^۳	۲۹۷۱.۲۳۹×۱۰^۳
b	-۶۷۱۴/۴۰۳	۳۸۱۷.۹۶۶×۱۰^۲۳	۷۶۸۹.۷۷۹×۱۰^۲۳	۷۶۸۹.۷۷۹×۱۰^۲۳
c	-۹۹۴۴۲۲/۱۰۶	۱۵۹۳.۱۹۲×۱۰^۶	-۳۲۰۸.۸۵۶×۱۰^۶	۳۲۰۸.۸۵۴×۱۰^۶
d	۰/۰۷۰	۰/۱۸۲	-۰/۲۹۶	۰/۴۳۷
e	-۱۲۴۴/۴۲۹	۱۴۰۲/۵۹۴	-۴۰۶۹/۳۹۹	۱۵۸۰/۵۴۲
f	۲۷۶۳/۰۳۹×۱۰^۳	۳۸۱۷.۹۶۶×۱۰^۲۳	-۷۶۸۹.۷۷۹×۱۰^۲۳	۷۶۸۹.۷۷۹×۱۰^۲۳
g	۷۷۷۰/۰۱۹	۴۰۵۱/۷۱۰	-۳۹۰/۵۴۴	۱۵۹۳۰/۵۸۲
h	-۷/۱۹۱	۳۳۳/۴۹۹	-۶۷۸/۸۹۲	۶۶۴/۵۱۰
i	-۶۸۸۵۱۶۳/۲۴۱	۰/۰۰۱	-۶۸۸۵.۱۶۳×۱۰^۳	-۶۸۸۵.۱۶۳×۱۰^۳
j	-۰/۰۰۱	۲۴۳/۱۸۱	-۴۸۹/۷۹۱	۴۸۹/۷۹۰
k	-۱۲۱/۹۷۱	۱۲۱۹.۹۰۷×۱۰^۶	-۲۴۵۷.۰۲۰×۱۰^۶	۲۴۵۷.۰۲۰×۱۰^۶
m	۲۴۷۸/۶۳۷×۱۰^۳	۱۸۲۴.۸۴۰×۱۰^۶	-۳۶۷۵.۴۱۴×۱۰^۶	۳۶۷۵.۴۱۹×۱۰^۶
n	۰	۹۶۰۸.۸۰۱×۱۰^۸	-۱۹۳۵.۳۱۱×۱۰^۸	۱۹۳۵.۳۱۱×۱۰^۸
o	-۱۲۸۶/۵۲۶	۰	-۱۲۸۶/۵۲۷	-۱۲۸۶/۵۲۵
p	۲۴۷۸/۶۳۷×۱۰^۳	۲۵۷۲.۰۱۱×۱۰^۱۴	-۵۱۸۰.۲۹۶×۱۰^۱۴	۵۱۸۰.۲۹۶×۱۰^۱۴
r	-۱۷۷۷/۰۵۳×۱۰^۳	۴۵۹/۶۶۵	-۱۷۸۶.۳۱×۱۰^۲	-۱۷۶۷.۷۹۵×۱۰^۲
s	۸۸۱/۲۱۰	۳۴۷۳۷/۲۱۷	-۶۹۰۸۳/۱۳۶	۷۰۸۴۵/۵۵۶
t	۵۱۸۹/۳۳۸×۱۰^۲	۱۵۶۳.۵۰۹×۱۰^۲	۴۸۷۴.۴۳۲×۱۰^۲	۵۵۰۴.۲۴۵×۱۰^۲
v	-۰/۰۰۱	۰	-۰/۰۰۱	۰

براساس نتایج، معناداری آزمون تایید شده و میزان آر اسکوار، ۰/۹۸۶ به‌دست آمد. میزان آر اسکوار به‌دست‌آمده در آزمون نشان داد که معادله حاصل، با ضریب اطمینان بیش از ۹۵٪، ۹۸/۶٪ مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان را بر مبنای مشخصات کلی ساختمان شامل مساحت دیوارهای خارجی، مساحت دیوارهای داخلی، مساحت سقف تیرچه بلوک، مساحت سقف عرشه فولادی، مساحت فونداسیون کف، تعداد روز ساخت‌وساز و تعداد کارگرها در هر روز پیش‌بینی کرد. براساس یافته‌های آزمون رگرسیون غیرخطی، میزان آر اسکوار نسبت به مدل خطی ۰/۰۷۴ واحد بالاتر به‌دست آمد و معادله نهایی مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان ارایه شد:

$$\begin{aligned} BCW = 2966754.938 &+ (-6714.403 \times EWA) \\ &+ (-994422.106 \times EWA^2) \\ &+ (0.070 \times EWA^3) \\ &+ (-1244.429 \times IWA) \\ &+ (2763039.099 \times IWA^2) \\ &+ (7.191 \times BBA) \\ &+ (-6885163.241 \times BBA^2) \\ &+ (-0.001 \times BBA^3) \\ &+ (-121.971 \times SDA) \\ &+ (2478637.362 \times SDA^2) \\ &+ (-1286.526 \times GFA) \\ &+ (789518.263 \times GFA^2) \\ &+ (-177705.352 \times BWN) \\ &+ (7770.019 \times BWN^2) \\ &+ (881.210 \times CDN) \\ &+ (518933.890 \times CDN^2) \\ &+ (-0.001 \times CDN^3) \end{aligned}$$

در ادامه فرآیند، مدل‌یابی مصرف آب عملیاتی ساختمان در دوره یک‌ساله، مبتنی بر مشخصات کلی ساختمان مد نظر قرار گرفت. براساس یافته‌های رگرسیون انحنایی، مدل غیرخطی مصرف آب عملیاتی ساختمان برای یک سال مبتنی بر مشخصات کلی ساختمان شامل مساحت واحدهای ساختمان، تعداد واحدهای ساختمان، مساحت زیربنای کف ساختمان و تعداد ساکنین ساختمان به شرح زیر تعریف شد و مورد ارزیابی قرار گرفت:

$$\begin{aligned} BCW = a &+ (b \times BUA) + (c \times BUA^2) \\ &+ (d \times BUA^3) + (e \times BUN) \\ &+ (f \times BUN^2) + (g \times BUN^3) \\ &+ (h \times GFA) + (i \times GFA^2) \\ &+ (n \times GFA^3) + (j \times BRN) \\ &+ (k \times BRN^2) + (m \times BRN^3) \end{aligned}$$

براساس نتایج آزمون رگرسیون، معادله غیرخطی مصرف آب عملیاتی ساختمان برای یک سال (BCW)، بر مبنای مساحت واحدهای ساختمان (BUA)، تعداد واحدهای ساختمان (BUN)، مساحت زیربنای کف ساختمان (GFA) و تعداد ساکنین ساختمان (BRN) تعریف شد. فرآیند آزمون رگرسیون در ۲۴۱ دوره انجام شده و براساس نتایج آزمون، میزان آر اسکوار ۰/۹۵۵ به‌دست آمد.

میزان آر اسکوار به‌دست‌آمده در آزمون نشان داد که معادله حاصل با ضریب اطمینان بیش از ۹۵٪، ۹۵/۵٪ مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان را بر مبنای مشخصات کلی ساختمان شامل تعداد واحدهای ساختمان، مساحت واحدهای ساختمان، مساحت زیربنای ساختمان و تعداد ساکنین ساختمان پیش‌بینی می‌کند.

با توجه به اینکه این میزان بر مبنای پیمایش میدانی آپارتمان‌های مسکونی شهر تهران به‌دست آمد، سبک زندگی ساکنین شهر تهران را در خود داشت و دستاورد بزرگی در مدل‌یابی عملکرد آب ساختمان بود. براساس یافته‌های آزمون رگرسیون غیرخطی، میزان آر اسکوار نسبت به مدل خطی ۰/۱۱۲ واحد بالاتر به‌دست آمد و بر این اساس، معادله حاصل، حدود ۱۱/۲٪، پیش‌بینی بهتری را از مصرف آب عملیاتی ساختمان برای یک سال ارایه داد (جدول ۳).

بر این اساس، برای مصرف آب عملیاتی ساختمان برای یک سال، معادله غیرخطی مطلوب‌تر است و توانست در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. معادله نهایی مصرف آب عملیاتی ساختمان برای یک سال ارایه شد:

$$\begin{aligned} BCW = -11132497.407 &+ (488507.126 \times BUA) \\ &+ (-4297.074 \times BUA^2) \\ &+ (12.683 \times BUA^3) \\ &+ (1390998.933 \times BUN) \\ &+ (-243478.543 \times BUN^2) \\ &+ (14058.008 \times BUN^3) \\ &+ (-64697.152 \times GFA) \\ &+ (173.037 \times GFA^2) \\ &+ (-1012333.428 \times GFA^3) \\ &+ (-1012333.428 \times BRN) \\ &+ (79654.003 \times BRN^2) \\ &+ (-1854.517 \times BRN^3) \end{aligned}$$

جدول ۳) نتایج آزمون رگرسیون غیرخطی بین مصرف انرژی کل واحد مسکونی با عوامل کالبدی ساختمان

ضرایب معادله	ضریب تخمینی	خطای استاندارد	۹۵٪ فاصله اطمینان	
			حداقل ضریب	حداکثر ضریب
a	-۱۱۱۳۲۴۹۷/۴۰۷	۲۷۲۳۶۰۳/۳۰۸	-۱۶۶۰۰۳۵۹/۲۰۵	-۵۶۶۴۶۳۵/۶۰۹
b	۴۸۸۵۰۷/۱۲۶	۶۶۷۹۸/۶۹۵	۳۵۴۴۰۳/۱۵۱	۶۲۲۶۱۱/۱۰۱
c	-۴۲۹۷/۰۷۴	۶۴۸/۵۳۷	-۵۵۹۹/۰۶۶	۲۹۹۵/۰۸۵
d	۱۲/۶۸۳	۲/۱۱۲	۸/۴۴۳	۱۶/۹۲۴
e	۱۳۹۰۹۹۸/۹۳۳	۴۲۵۲۳۸/۷۵۲	۵۳۷۲۹۶/۵۱۶	۲۲۴۴۷۰۱/۳۵
f	-۲۴۳۴۷۸/۵۴۳	۹۷۰۵۱/۰۰۷	-۴۳۸۳۱۶/۵۶۸	-۴۸۶۴۰/۵۱۷
g	۱۴۰۵۸/۰۰۸	۶۰۸۹/۲۳۱	۱۸۳۳/۳۶۵	۲۶۲۸۲/۶۵
h	-۶۴۶۹۷/۱۵۲	۴۶۹۲۱/۱۹۳	-۱۵۸۸۹۵/۳۷۷	۲۹۵۰۱/۰۷۴
i	۱۷۳/۰۳۷	۲۵۵/۹۹۱	-۳۴۰/۸۸۷	۶۸۶/۹۶۰
j	-۱۰۱۲۳۳۳/۴۲۸	۲۲۱۰۵۱/۱۰۷	-۱۴۵۶۱۱۲/۰۴۳	-۵۶۸۵۵۴/۸۱۲
k	۷۹۶۵۴/۰۰۳	۱۵۵۳۹/۱۰۵	۴۸۴۵۷/۹۴۸	۱۱۰۸۵۰/۰۵۸
m	-۱۸۵۴/۵۱۷	۳۵۰/۰۹۷	-۲۵۵۷/۳۶۵	-۱۱۵۱/۶۶۸
n	-۰/۰۳۳	۰/۴۵۷	-۰/۹۵۰	۰/۸۸۳

معادله حاصل، در فرآیند شبیه‌سازی عملکرد آب ساختمان در قالب آموزش الگوریتم از طریق تعریف ژن‌های ورودی شامل تعداد واحدهای ساختمان، مساحت واحدهای ساختمان، مساحت زیربنای ساختمان و تعداد ساکنین ساختمان مورد استفاده قرار گرفت. براساس معادلات به‌دست‌آمده، الگوریتم شبیه‌سازی عملکرد آب ساختمان تعریف شد. پس از تنظیم الگوریتم شبیه‌سازی عملکرد آب، به منظور اعتبارسنجی، آزمون همبستگی بین مقادیر مصرف آب واقعی و شبیه‌سازی‌شده آپارتمان‌های مسکونی انجام شد و معناداری آزمون کمتر از ۰/۰۵ و ضریب همبستگی، بالاتر از ۰/۷۵ به‌دست آمد و اعتبار فرآیند شبیه‌سازی تایید شد.

در ادامه، فرآیند بهینه‌سازی انجام شد. به همین منظور، گام‌بندی ژن‌های مدل‌های پیکربندی فضایی فرآیند بهینه‌سازی در جدول ارایه شد و دو فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب ۲ تنظیم شد (جدول ۴).

جدول ۴) گام‌بندی ژن‌های مدل‌های پیکربندی فضایی فرآیند بهینه‌سازی و مشخصات حاصل از آن

مقادیر	گام حداقل	گام حداکثر	مقدار هر گام
ژن‌های ورودی الگوریتم			
طول ضلع شمالی-جنوبی	۷/۰۰	۲۱/۰۰	۰/۰۱۰
شاخص مساحت فضاهای داخلی	۰	۱/۰۰	۰/۰۱۰
شاخص ضلع شمالی-جنوبی فضاهای داخلی	۰	۱/۰۰	۰/۰۱۰
شاخص جهت‌گیری فضای ارتباط عمودی	۰	۳/۰۰	۱/۰۰۰
شاخص موقعیت فضای ارتباط عمودی	۰	۱/۰۰	۰/۰۱۰
شاخص راس فضاهای داخلی	۰	۳/۰۰	۱/۰۰۰
شاخص راس زیربنای آپارتمان مسکونی	۰	۳/۰۰	۱/۰۰۰
ارتفاع فضاهای داخلی	۲/۶۰	۴/۰۰	۰/۱۰۰
نسبت پنجره به دیوار نمای شمالی	۰/۱۰	۰/۵۰	۰/۱۰۰
نسبت پنجره به دیوار نمای جنوبی	۰/۱۰	۰/۵۰	۰/۱۰۰
نسبت پنجره به دیوار نمای شمال فضای ارتباط عمودی	۰/۱۰	۰/۵۰	۰/۱۰۰
نسبت پنجره به دیوار نمای جنوب فضای ارتباط عمودی	۰/۱۰	۰/۵۰	۰/۱۰۰
مقادیر ابعاد فضاها			
مساحت پذیرایی	۴۰/۵۰	۸۲/۵۰	۰/۴۲۰
مساحت آشپزخانه	۱۳/۵۰	۳۹/۰۰	۰/۲۵۵
مساحت اتاق خواب اصلی	۱۵/۰۰	۳۷/۵۰	۰/۲۲۵
مساحت اتاق خواب دوم	۱۳/۵۰	۳۰/۰۰	۰/۱۶۵
مساحت حمام	۱/۵۰	۱۲/۰۰	۰/۱۰۵
مساحت سرویس بهداشتی	۱/۵۰	۱۳/۵۰	۰/۱۲۰
مساحت فضای ارتباط عمودی	۱۵/۰۰	۳۳/۰۰	۰/۱۸۰
ضلع شمالی-جنوبی پذیرایی	۳/۳۰	۱۲/۲۷	۰/۰۹۰
ضلع شمالی-جنوبی آشپزخانه	۲/۴۰	۵/۶۲	۰/۰۳۲
ضلع شمالی-جنوبی اتاق خواب اصلی	۳/۰۰	۵/۰۰	۰/۰۲۰
ضلع شمالی-جنوبی اتاق خواب دوم	۲/۴۰	۵/۶۲	۰/۰۳۲
ضلع شمالی-جنوبی حمام	۱/۱۰	۱/۳۶	۰/۰۰۳
ضلع شمالی-جنوبی سرویس بهداشتی	۱/۱۰	۱/۳۶	۰/۰۰۳
ضلع شمالی-جنوبی فضای ارتباط عمودی	۳/۰۰	۵/۰۰	۰/۰۲۰

جدول ۵) گام‌بندی ژن‌های سیستم‌های سازه و مصالح مدل‌های پیکربندی فضایی فرآیند بهینه‌سازی و مشخصات حاصل از آن

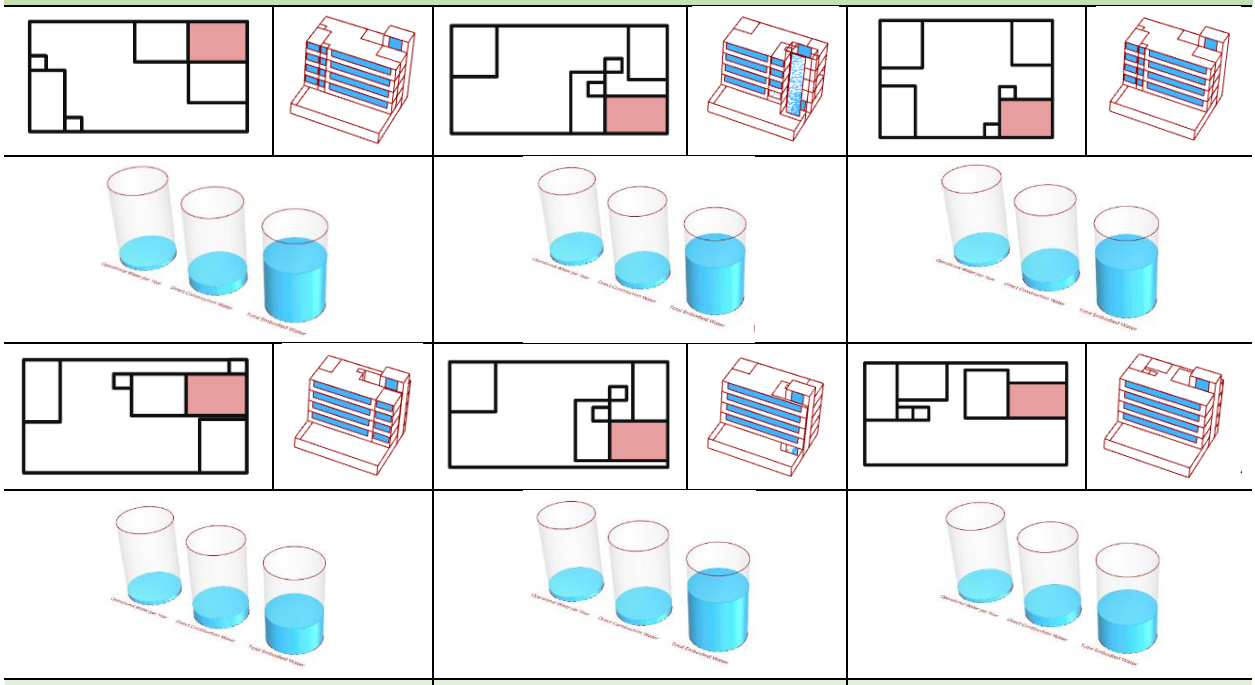
ژن‌های سازه	مشخصات سیستم سازه سقف	مشخصات دیوار خارجی	مشخصات دیوار داخلی	مشخصات پنجره‌های نما
جایگزین‌های سازه‌ای	**سیستم** ۱) تیرچه و بلوک پلی‌استایرن ۲) عرشه فولادی	۱) آجر سفالی با نمای آجری ۲) بلوک بتنی با نمای آجری ۳) بلوک گچی با نمای آجری ۴) آجر سفالی با نمای سنگی ۵) بلوک بتنی با نمای سنگی ۶) بلوک گچی با نمای سنگی	۱) آجر سفالی ۲) بلوک بتنی ۳) بلوک گچی	۱) تک‌جداره آلومینیوم ۲) تک‌جداره پی‌وی‌سی ۳) دوجداره آلومینیوم ۴) دوجداره پی‌وی‌سی

براساس نتایج، ۳۰ پاسخ نسل ۲۹۹ در دو فرآیند بهینه‌سازی، به عنوان پاسخ های بهینه مرز پارتو به‌دست آمد. به منظور بررسی پاسخ‌های بهینه، آنها از نظر عملکرد انرژی در هر مساحت به سه کلاس تقسیم‌بندی شد (شکل ۱). به طور کلی، در فرآیند بهینه‌سازی شماره یک، همه پاسخ‌ها دارای کشیدگی شرقی-غربی بودند و فضای ارتباط عمودی در جبهه شرقی قرار داشتند و دارای ارتفاع داخلی ۲/۶ متر بودند. همچنین در همه پاسخ‌ها نسبت پنجره به دیوار در همه جبهه‌ها ۰/۵ به‌دست آمد. در غالب پاسخ‌ها، فضای ارتباط عمودی در جنوب شرقی قرار داشت. همچنین، بررسی سیستم‌های ساختمانی پاسخ‌های مرز پارتو فرآیند بهینه‌سازی یک نشان داد که از هر دو سیستم تیرچه و بلوک و عرشه فولادی در بین پاسخ‌های پارتو استفاده شد؛ درصد بیشتری از پاسخ‌ها از سیستم عرشه فولادی استفاده کردند. همچنین، همه پاسخ‌های مرز پارتو، دارای دیوار خارجی از جنس بلوک گچی با نمای سنگی بودند؛ که نشان‌دهنده

برتری این سیستم از نظر عملکرد آب بود. همچنین دو نوع دیوار داخلی شامل ۳ دیوار بلوک بتنی و ۲۷ دیوار بلوک گچی وجود داشتند که در این بخش هم، برتری بلوک گچی نسبت به سایر پاسخ‌ها قابل استنتاج بود. بررسی مشخصات پنجره نیز نشان‌دهنده فراوانی صددرصدی سیستم پنجره تک‌جداره پی‌وی‌سی در بین ۳۰ پاسخ پارتو بود. در فرآیند بهینه‌سازی شماره دو نیز همه پاسخ‌ها، دارای کشیدگی شرقی-غربی بودند و در اغلب پاسخ‌ها، فضای ارتباط عمودی در گوشه‌های شمال شرقی و جنوب شرقی قرار داشتند. همچنین همه پاسخ‌ها دارای ارتفاع ۲/۶ متر بودند.

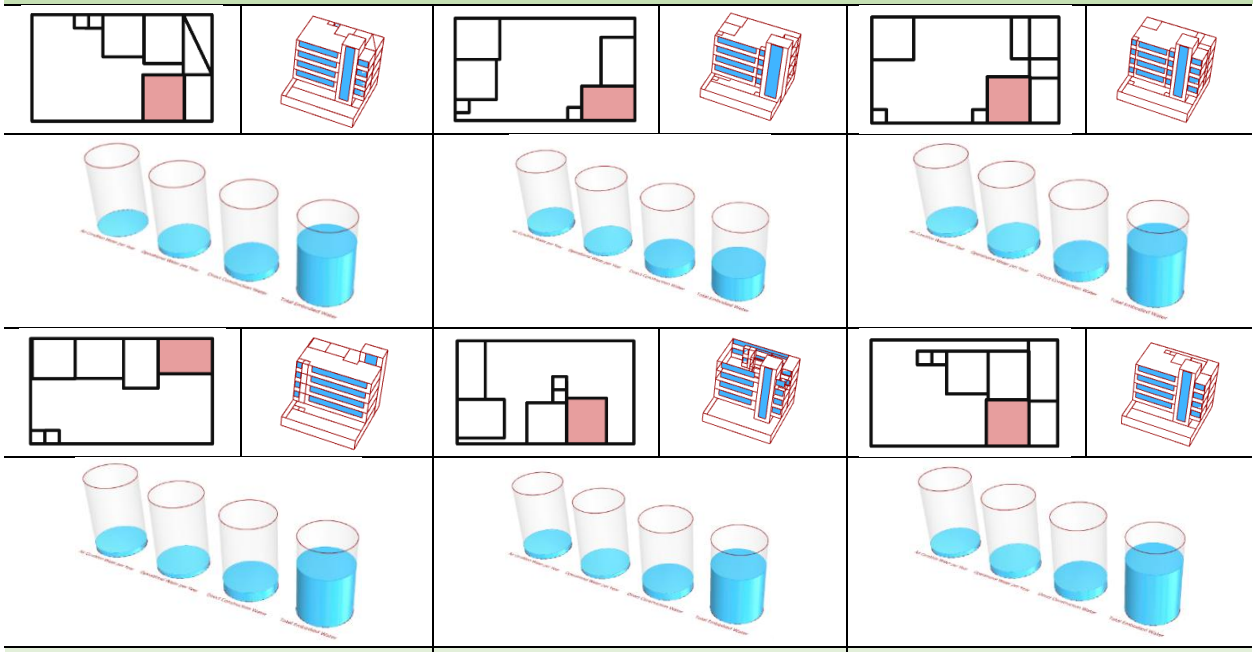
تقریباً در همه پاسخ‌ها نسبت پنجره به دیوار در همه جبهه‌ها ۰/۵ به‌دست آمد. در تعداد کمی از پاسخ‌ها نیز نسبت پنجره به دیوار ۰/۴۵ به‌دست آمد.

بهینه‌سازی شماره یک: سه هدف عملکردی ساختمان: مصرف آب نهفته مصالح مصرف آب ساخت‌وساز و مصرف آب عملیاتی



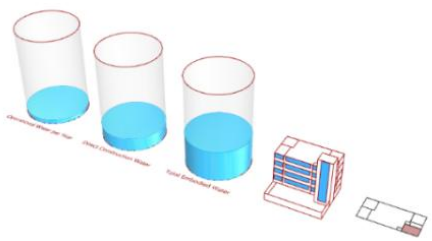
کلاس یک پاسخ‌های مرز پارتو	کلاس دو پاسخ‌های مرز پارتو	کلاس سه پاسخ‌های مرز پارتو
فضای ارتباط عمودی در شرق و جنوب شرقی	فضای ارتباط عمودی در جنوب شرقی	فضای ارتباط عمودی در شمال شرقی

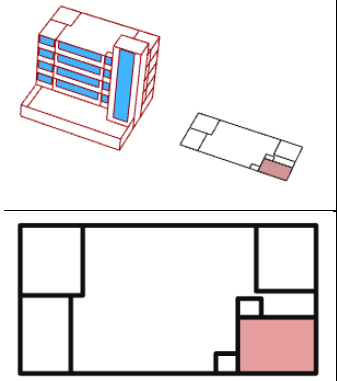
بهینه‌سازی شماره دو: سه هدف عملکردی ساختمان: مصرف آب نهفته مصالح، مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان و مصرف آب عملیاتی، مصرف آب تاسیسات مکانیکی

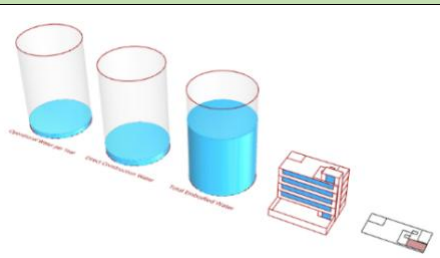


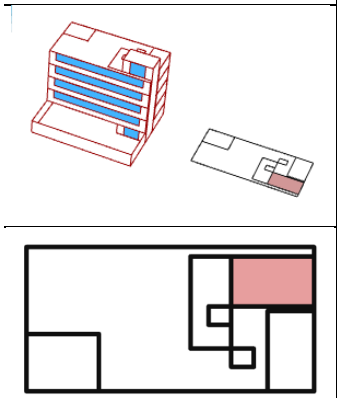
کلاس یک پاسخ‌های مرز پارتو	کلاس دو پاسخ‌های مرز پارتو	کلاس سه پاسخ‌های مرز پارتو
فضای ارتباط عمودی در جنوب	فضای ارتباط عمودی در جنوب و جنوب شرقی	فضای ارتباط عمودی در شمال شرقی و جنوب

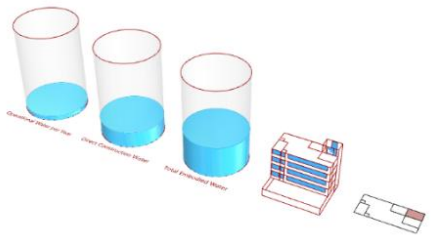
شکل ۱) تنوع طرح‌های موجود در هر کلاس در دو فرآیند بهینه‌سازی پیکربندی بر مبنای عملکرد آب ساختمان

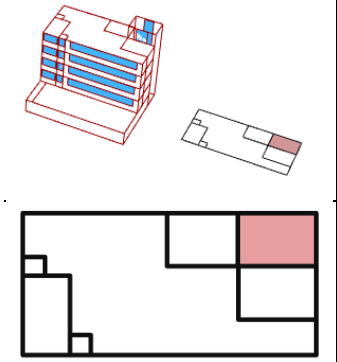
کمترین مصرف آب نهفته مصالح ساختمان در فرآیند بهینه‌سازی شماره یک	
ضلع شمالی-جنوبی: ۸/٦٦ متر	
ضلع شرقی-غربی: ۱۷/۳۲ متر	
نسبت اضلاع: ۲	
ارتفاع فضاهای داخلی: ۲/٦ متر	
سیستم سازه سقف: **عرشه فولادی** دیوار خارجی: **بلوک گچی با نمای سنگی** دیوار داخلی: **بلوک گچی** نوع پنجره‌های نما: **تک‌جداره پی‌وی‌سی**	
جایگاه فضای ارتباط عمودی: **جنوب شرقی**	مصرف آب نهفته مصالح ساختمان: **۳۲۰۹۹۰۰** لیتر
جایگاه پذیرایی: **مرکز متصل به شمال و جنوب**	مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان: **۱٤۰۰۹۰۰** لیتر
جایگاه سایر فضاهای داخلی: **شرق و غرب**	مصرف آب عملیاتی ساختمان: **٤٦۹۷۸۱/۵** لیتر



کمترین مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان در فرآیند بهینه‌سازی شماره یک	
ضلع شمالی-جنوبی: **۸/٦٦** متر	
ضلع شرقی-غربی: **۱۷/۳۲** متر	
نسبت اضلاع: **۲**	
ارتفاع فضاهای داخلی: **۲/٦** متر	
سیستم سازه سقف: **تیرچه و بلوک پلی‌استایرن** دیوار خارجی: **بلوک گچی با نمای سنگی** دیوار داخلی: **بلوک گچی** نوع پنجره‌های نما: **تک‌جداره پی‌وی‌سی**	
جایگاه فضای ارتباط عمودی: **شمال شرقی**	مصرف آب نهفته مصالح ساختمان: **٦۲۹۸۹۰۰** لیتر
جایگاه پذیرایی: **شمال غربی متصل جنوب**	مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان: **۷۱۸۲۹۹/۸** لیتر
جایگاه سایر فضاهای داخلی: **شرق و جنوب غربی**	مصرف آب عملیاتی ساختمان: **٥٤۲۸٥۲/۱** لیتر



کمترین مصرف آب عملیاتی ساختمان در فرآیند بهینه‌سازی شماره یک	
ضلع شمالی-جنوبی: **۸/۵** متر	
ضلع شرقی-غربی: **۱۷/٦٤** متر	
نسبت اضلاع: **۲**	
ارتفاع فضاهای داخلی: **۲/٦** متر	
سیستم سازه سقف: **عرشه فولادی** دیوار خارجی: **بلوک گچی با نمای سنگی** دیوار داخلی: **بلوک گچی** نوع پنجره‌های نما: **تک‌جداره پی‌وی‌سی**	
جایگاه فضای ارتباط عمودی: **شمال شرقی**	مصرف آب نهفته مصالح ساختمان: **۳۲٦٦۹۰۰** لیتر
جایگاه پذیرایی: **شمال غربی متصل جنوب**	مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان: **۱٦۹٥۲۰۰** لیتر
جایگاه سایر فضاهای داخلی: **شرق و جنوب غربی**	مصرف آب عملیاتی ساختمان: **٤٦۹٤٥۷/۹** لیتر



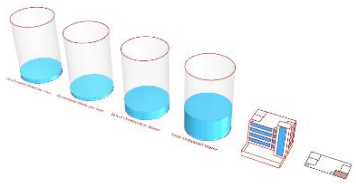
شکل ۲) بهترین پاسخ‌های هر هدف عملکردی در بهینه‌سازی شماره یک

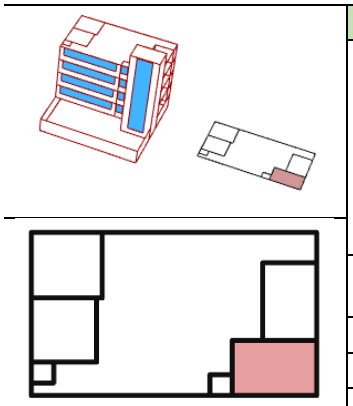
بررسی روی سیستم‌های ساختمانی پاسخ‌های مرز پارتو فرآیند بهینه‌سازی دو نشان داد که از هر دو سیستم تیرچه و بلوک و عرشه فولادی در بین پاسخ‌های پارتو استفاده شد؛ درصد بیشتری از پاسخ‌ها از سیستم تیرچه و بلوک پلی‌استایرن استفاده کردند (شکل ۲).

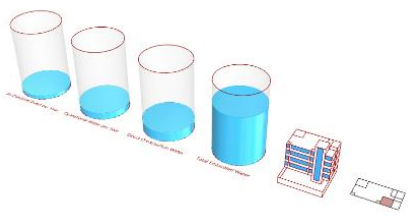
همچنین، همه پاسخ‌های مرز پارتو فرآیند بهینه‌سازی دو، دارای دیوار خارجی از جنس بلوک گچی، بتنی و سفالی با نمای آجری بودند؛ که نشان‌دهنده برتری نمای آجری بر مبنای چهار هدف عملکردی بود. همچنین در بین پاسخ‌های مرز پارتو، دو نوع دیوار داخلی شامل بلوک بتنی ۲ مورد و بلوک گچی ۲۸ مورد بودند. به طور کلی، برتری بلوک گچی نسبت به سایر پاسخ‌ها در دو فرآیند بهینه‌سازی انجام‌شده قابل استنتاج بود. بررسی مشخصات پنجره نیز، دو سیستم پنجره شامل ۲۵ مورد پنجره تک‌جداره پی‌وی‌سی و ۵ مورد دوجداره آلومینیوم را تایید کرد (شکل ۳).

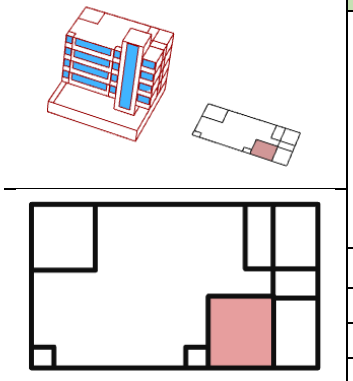
همچنین بررسی تطبیقی بین بهترین عملکردهای انرژی در طول دو فرآیند بهینه‌سازی، انجام شد (شکل ۲ و ۳). بر مبنای بررسی نتایج دو فرآیند بهینه‌سازی، بیشترین میزان کاهش مصرف آب نهفته مصالح ۵۳/۹۸٪، بیشترین میزان کاهش مصرف آب ساخت‌وساز، ۵٦/۷٦٪، بیشترین میزان کاهش مصرف آب عملیاتی، ۵۳/۹۸٪ و بیشترین میزان کاهش مصرف آب تاسیسات مکانیکی، ۵۳/۹۸٪ بود. براساس نتایج دو فرآیند بهینه‌سازی انجام شده و پاسخ‌های مرز پارتو، مجموعه‌ای از مشخصات پیکربندی فضایی برای آپارتمان مسکونی تبیین شد که منجر به بهینه‌سازی عملکرد آب ساختمان شد. بر این اساس، نموداری برای تغییرات مشخصات هندسی به منظور بهینه‌سازی عملکرد آب ساختمان ارایه شد. براساس یافته‌های به‌دست‌آمده از دو آزمون بهینه‌سازی، استنتاج شد که

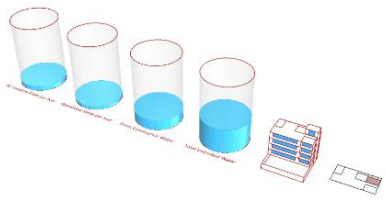
کشیدگی شرقی-غربی آپارتمان مسکونی، در یک مساحت زیربنای مساوی، منجر به بهبود عملکرد آب ساختمان شد. همچنین نتایج نشان داد که کاهش دیوارهای جداکننده، عملکرد آب را بهبود بخشید. همچنین نتایج نشان داد که کشیدگی شمالی-جنوبی بزرگ‌ترین فضای واحد مسکونی یعنی فضای پذیرایی، با دسترسی به جبهه‌های نورگیر، منجر به بهبود عملکرد آب ساختمان شد. همچنین، کاهش ارتفاع و مساحت فضاهای داخلی تا حد ممکن و استاندارد منجر به عملکرد بهینه آب ساختمان شد.

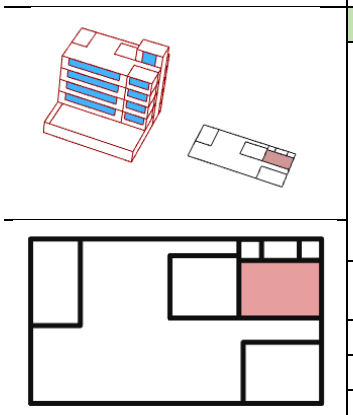
کمترین مصرف آب نهفته مصالح ساختمان در فرآیند بهینه‌سازی شماره دو	
ضلع شمالی-جنوبی: **۹/۲٤** متر	
ضلع شرقی-غربی: **۱٦/۲۳** متر	
نسبت اضلاع: **۱/۷۵**	
ارتفاع فضاهای داخلی: ۲/٦ متر	
سیستم سازه سقف: **عرشه فولادی** دیوار خارجی: **بلوک گچی با نمای آجری** دیوار داخلی: **بلوک گچی** نوع پنجره‌های نما: **تک‌جداره پی‌وی‌سی**	مصرف آب نهفته مصالح ساختمان: **۳۲٤۵۹۰۰** لیتر
جایگاه فضای ارتباط عمودی: **جنوب شرقی**	مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان: **۱۳۸٤۰۰۰** لیتر
جایگاه پذیرایی: **مرکز متصل به شمال و جنوب**	مصرف آب عملیاتی ساختمان: **٤٦۹۷۳۳/۲۵٤** لیتر
جایگاه سایر فضاهای داخلی: **شرق و غرب**	مصرف آب تاسیسات مکانیکی ساختمان: **٦۵۵۸٤۷/٦۲** لیتر

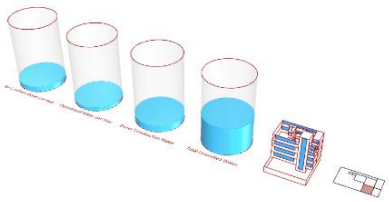


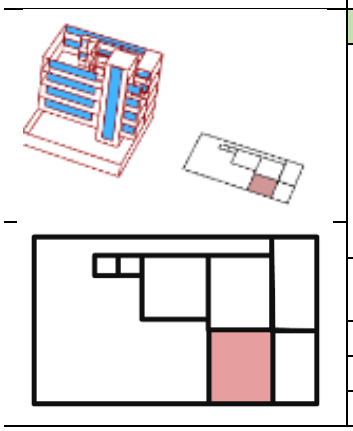
کمترین مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان در فرآیند بهینه‌سازی شماره دو	
ضلع شمالی-جنوبی: **۹/۲۳** متر	
ضلع شرقی-غربی: **۱٦/۲۵** متر	
نسبت اضلاع: **۱/۷۵**	
ارتفاع فضاهای داخلی: **۲/٦** متر	
سیستم سازه سقف: **تیرچه و بلوک پلی‌استایرن** دیوار خارجی: **آجر سفالی با نمای آجری** دیوار داخلی: **بلوک گچی** نوع پنجره‌های نما: **تک‌جداره پی‌وی‌سی**	مصرف آب نهفته مصالح ساختمان: **٦٦۰۹۲۰۰** لیتر
جایگاه فضای ارتباط عمودی: **جنوب شرقی**	مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان: **۱۳۱۵۸۰۰** لیتر
جایگاه پذیرایی: **جنوب غربی متصل شمال**	مصرف آب عملیاتی ساختمان: **۹٤۷٤۳٦/۸٤** لیتر
جایگاه سایر فضاهای داخلی: **شرق و شمال غربی**	مصرف آب تاسیسات مکانیکی ساختمان: **۵۲۹۸٦۰/۸٦** لیتر



کمترین مصرف آب عملیاتی ساختمان در فرآیند بهینه‌سازی شماره دو	
ضلع شمالی-جنوبی: **۹/۲۱** متر	
ضلع شرقی-غربی: **۱٦/۲۸** متر	
نسبت اضلاع: **۱/۷۵**	
ارتفاع فضاهای داخلی: **۲/٦** متر	
سیستم سازه سقف: **عرشه فولادی** دیوار خارجی: **بلوک گچی با نمای آجری** دیوار داخلی: **بلوک گچی** نوع پنجره‌های نما: **تک‌جداره پی‌وی‌سی**	مصرف آب نهفته مصالح ساختمان: **۳٤۱٦۹۰۰** لیتر
جایگاه فضای ارتباط عمودی: **شمال شرقی**	مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان: **۱۵۱۸۸۰۰** لیتر
جایگاه پذیرایی: **جنوب غربی متصل شمال**	مصرف آب عملیاتی ساختمان: **٤٦۹٦۱۳/٦٦** لیتر
جایگاه سایر فضاهای داخلی: **شرق و شمال غربی**	مصرف آب تاسیسات مکانیکی ساختمان: **۷۰٦۲۷۲/۲۲** لیتر



کمترین مصرف آب تاسیسات مکانیکی ساختمان در فرآیند بهینه‌سازی شماره دو	
ضلع شمالی-جنوبی: **۹/٤۱** متر	
ضلع شرقی-غربی: **۱۵/۹٤** متر	
نسبت اضلاع: **۱/۷۰**	
ارتفاع فضاهای داخلی: **۲/٦** متر	
سیستم سازه سقف: **تیرچه و بلوک پلی‌استایرن** دیوار خارجی: **آجر سفالی با نمای آجری** دیوار داخلی: **بلوک بتنی** نوع پنجره‌های نما: **دوجداره آلومینیوم**	مصرف آب نهفته مصالح ساختمان: **۳۸٦۵۵۰۰** لیتر
جایگاه فضای ارتباط عمودی: **جنوب شرقی**	مصرف آب ساخت‌وساز ساختمان: **۹۷۲٤۲۰/۳۲** لیتر
جایگاه پذیرایی: **جنوب غربی متصل شمال**	مصرف آب عملیاتی ساختمان: **۵۱۱۱۲۳/۰۵** لیتر
جایگاه سایر فضاهای داخلی: **شرق و مرکز**	مصرف آب تاسیسات مکانیکی ساختمان: **۷۹۹۳۸۷/۰۳** لیتر



شکل ۳) بهترین پاسخ‌های هر هدف عملکردی در بهینه‌سازی شماره دو

ابعاد زیربنای آپارتمان مسکونی و ابعاد و موقعیت فضاهای داخلی، تاثیر قابل توجهی بر عملکرد آب ساختمان داشت. به طور کلی ابعاد و موقعیت فضای پذیرایی به عنوان بزرگ‌ترین فضای واحد مسکونی، در تعیین عملکرد آب ساختمان مسکونی، دارای اهمیت زیادی بود. کشیدگی شرقی-غربی ساختمان در تعریف بهتر چیدمان فضاهای داخلی و میزان دیوارهای داخلی و خارجی کمک کرد و از این طریق مصرف آب ساخت‌وساز و آب نهفته مصالح را کاهش داد. همچنین در آپارتمان‌های مسکونی شهر تهران، کشیدگی فضای پذیرایی در جهت شمالی-جنوبی منجر به بهینه‌سازی عملکرد آب شد. همچنین در کنار فضای پذیرایی، ابعاد و جایگاه فضای ارتباط عمودی نیز از مهم‌ترین عوامل پیکربندی در بهینه‌سازی عملکرد آب بود؛ به طوری که در قرارگیری دستگاه ارتباط عمودی در گوشه جنوب شرقی زیربنا، منجر به بهینه‌سازی عملکرد آب ساختمان شد. مساحت و جانمایی سایر فضاهای واحد مسکونی نیز عاملی مهم در عملکرد آب ساختمان بود.

بحث

هدف این پژوهش بهینه‌سازی عملکرد آب آپارتمان‌های مسکونی متداول شهر تهران بر مبنای مشخصات هندسی، برای استفاده در برنامه‌ریزی‌های کلان این شهر بود. یافته‌های پژوهش نشان داد که مشخصات هندسی آپارتمان‌های مسکونی، تاثیر قابل توجه و قابل پیش‌بینی بر عملکرد آب ساختمان و به تبع آن بر مصرف جهانی آب داشت. در بخش اول مقایسه تولید خودکار پیکربندی پژوهش مورد توجه قرار می‌گیرد. در مقایسه با پژوهش حاضر، پژوهش *لی* و همکاران [Li *et al.*, 2024]، بر مبنای راهکار تخصیص سلولی فضایی و بر کاربری مسکونی و با تعریف مرز از پیش تعیین‌شده شکل گرفته و در فرآیند تولید خودکار آن ژن‌ها و کنترل کمتری بر خروجی‌ها تامین شده است همچنین، به عنوان یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های پژوهش *لی* و همکاران [Li *et al.*, 2024]، با پژوهش حاضر، در انتهای مسیر تولید خودکار پیکربندی فضایی، از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط دو (NSGA-II) به منظور بهینه‌سازی طول مسیر گردش و عدم همپوشانی فضاها استفاد شده است. میانگین زمان اجرای الگوریتم برای تکمیل تولید برای هر نسل به تعداد ۵۰ راه حل حدود ۴۰ دقیقه بوده که در مقایسه با پژوهش حاضر، زمان بسیار زیادی محسوب می‌شود. همچنین، به عنوان یک روش متفاوت، *سو* و همکاران [Su *et al.*, 2024]، بر تولید طرح‌های پیکربندی با سازوکار یادگیری ماشین بر مبنای استخراج دانش توپولوژیکی تمرکز کرده و با توجه به سازوکار یادگیری ماشین در تولید خودکار، تنوع و واریانس پاسخ‌ها بسیار محدود بوده است. در این پژوهش نیز، سازوکار تولید پیکربندی فضایی، مرز ساختمان، واریانس پاسخ‌ها و سرعت تولید پیکربندی متفاوت از مطالعه حاضر است. پژوهش حاضر در مدت زمان بسیار کمتر به واریانس بالایی از پاسخ‌ها رسید. همچنین در فرآیند الگوریتم پژوهش حاضر، نیازی به الگوریتم بهینه‌سازی در تولید نبود.

همچنین، پژوهش *اکسیا* و همکاران [Xia *et al.*, 2024] در یک روش متفاوت، از داده‌های گراف برای نمایش پارامتریک پیکربندی فضایی مسکن استفاده می‌کند و سازوکار این پژوهش منجر به کاهش واریانس و ساده‌سازی پاسخ‌ها و در عین حال، کاربردی شدن فرم فضاهای داخلی نسبت به پژوهش حاضر شده است. پژوهش *رهبر* و همکاران [Rahbar *et al.*, 2022] یک رویکرد ترکیبی جدید برای تولید پیکربندی‌های با ترکیب مدل‌سازی مبتنی بر عامل با الگوریتم‌های یادگیری عمیق ارایه می‌کند. یکی از تفاوت‌های پژوهش *رهبر* و همکاران [Rahbar *et al.*, 2022] با پژوهش حاضر، تمرکز این پژوهش بر کشف چگونگی ایجاد طرح‌های پیکربندی دو بُعدی خودکار برای برآورده‌کردن الزامات توپولوژیکی و هندسی است. همچنین، پژوهش *ژانگ* و همکاران [Zhang *et al.*, 2021] بر پیکربندی فضایی مبتنی بر تشکیل چندین واحد فضایی و یک فضای گردش به عنوان مسیر ارتباط بین آنها تمرکز دارد. این موضوع واریانس پاسخ‌ها را کاهش داده و در عین حال پیچیدگی کدنویسی را نیز کاهش می‌دهد. فرآیند تولید طرح در الگوریتم پژوهش *ژانگ* و همکاران [Zhang *et al.*, 2021]، بین ۳۰ تا ۹۰ ثانیه طول می‌کشد تقریباً ۶ تا ۱۸ برابر زمان تولید طرح پژوهش حاضر است و پژوهش حاضر نسبت به آن سرعت بالاتری در تولید و ارزیابی پاسخ‌ها داشت و اهداف عملکردی متنوع‌تری را ارایه داد. مشابه ساختار الگوریتم طراحی خودکار پیکربندی پژوهش حاضر، پژوهش *کشاورزی* و *رحمانی‌اصل* [Keshavarzi & Rahmani-Asl, 2021]، سازوکاری به نام سیستم جن فلور (GenFloor) را به منظور برنامه‌ریزی چیدمان فضا ارایه می‌کند. این سازوکار بر مرز بیرونی کنترل ندارد و فرم‌هایی بی‌نظم و متنوع ایجاد می‌کند و در مقایسه با پژوهش حاضر، پاسخ‌ها دارای تنوع پایین‌تری در چیدمان فضاهای داخلی است. همچنین پیکربندی حاصل از پژوهش، در مرز از پیش تعیین‌شده شکل می‌گیرد و نتایجی کاملاً کاربردی را ارایه می‌دهد. پژوهش حاضر فضای ارتباط عمومی و ساختمان را در چند طبقه تعریف کرد. موضوع دیگر در تفاوت پژوهش *کشاورزی* و *رحمانی‌اصل* [Keshavarzi & Rahmani-Asl, 2021] با پژوهش حاضر، استفاده از ابزار بهینه‌سازی در تعریف پیکربندی است؛ که منجر به کاهش زمان تولید پاسخ‌های مطلوب می‌شود.

همچنین به طور کلی، در بین بررسی‌ها، هیچ پژوهش طراحی مولد پیکربندی یافت نشد که بر عملکرد آب ساختمان تمرکز کرده باشد. بر این اساس در این بخش به بررسی پژوهش‌هایی که روی عملکرد آب ساختمان تمرکز داشته‌اند، پرداخته شد. پژوهش *تبونا* و همکاران [Thebuwena *et al.*, 2024] با یک رویکرد مبتنی بر مطالعه موردی در کشور نروژ، به بررسی پتانسیل افزایش بهره‌وری آب در ساختمان‌های اداری بلندمرتبه در مناطق با آب و هوای گرمسیری پرداخته است و نتایج نشان داده است که با استفاده از وسایل کارآمد، مصرف آب ۵۵٪ کاهش، نیاز آبی محوطه‌سازی ۹۳٪ کاهش و راندمان کلی آب ۷۳٪ بهبود یافته است. پژوهش *شارما* و *چانی* [Sharma & Chani, 2024] نیز با رویکرد ترکیبی به بررسی

مصرف آب و انرژی در ساخت‌وساز ساختمان‌ها در کشور هند پرداخته است. این پژوهش از طریق تحلیل محتوای اسنادی بر آب نفهته مصالح تمرکز کرده است و برداشت میدانی بر روی ۶۴ آپارتمان مسکونی به منظور دستیابی به مصرف آب ساخت‌وساز و آب عملیاتی صورت گرفته است. به عنوان یکی از پژوهش‌های نزدیک به پژوهش حاضر، پژوهش *کامازانی* و همکاران [Kamazani *et al.*, 2024]، از یک چارچوب تکاملی چندمرحله‌ای و چندهدفه استفاده کرده و مصرف انرژی نهفته و عملیاتی، انتشار کربن و مصرف آب نهفته در ساختمان‌های کشور آمریکا را مد نظر قرار داده است. پژوهش *کامازانی* و همکاران [Kamazani *et al.*, 2024]، بر یک مدل ساختمان اداری در شرایط واقعی در ویرجینیا اعمال شده و در قیاس با آن پژوهش حاضر بر روی یک الگوریتم طراحی مولد تمرکز داشت که مجموعه متنوعی از پاسخ‌ها را بررسی می‌کند. پژوهش *کامازانی* و همکاران [Kamazani *et al.*, 2024]، کاهش ۶/۸درصدی انرژی عملیاتی و ۸/۷درصدی انتشار کربن، با افزایش ۴۳/۷درصدی مصرف آب تجسم‌یافته را به‌دست آورده است؛ اما در پژوهش حاضر، چهار هدف عملکردی آب ساختمان، به میزان قابل توجهی کاهش یافت. همچنین پژوهش *پرادیپ* و همکاران [Pradeep *et al.*, 2024]، از طریق استفاده از مدل ورودی-خروجی ترکیبی (IOH) برای محاسبه انرژی نهفته و آب نهفته چهار ساختمان دانشگاهی مبتنی بر داده‌های جمع‌آوری‌شده استفاده کرده‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد که کاهش مصرف انرژی نهفته به‌تنهایی تاثیر قابل توجهی بر کاهش مصرف آب نهفته ندارد زیرا سهم مصرف مستقیم آب در کل مصرف آب نهفته، ۱۳٪ تا ۱۶٪ است. این پژوهش اما بر تغییرات کالبدی تمرکز نکرده است. همچنین، در این پژوهش، سایر اهداف عملکردی آب را مورد بررسی قرار نگرفته است. نتایج پژوهش حاضر اما، تاثیر قابل توجه نیاز سرمایشی و گرمایشی بر مصرف آب ساختمان را تایید کرد. پژوهش *آنتائو-جرالدس* و همکاران [Antão-Geraldes *et al.*, 2023]، با رویکرد مختلط، به ردیابی تقاضای آب و بهینه‌سازی مصرف آن در یک بازار شهری در شمال شرقی پرتغال پرداخته است. براساس این پژوهش، اجرای سیستم جمع‌آوری آب باران، همراه با اقدامات کاهش مصرف، صرفه‌جویی ۷۴/۴٪ آب را ممکن می‌کند. در مقایسه با پژوهش حاضر، این پژوهش رویکردی محاسباتی را مد نظر قرار داده است. در پژوهش حاضر نیز به منظور بررسی آب نفهته مصالح ساختمان، رویکرد محاسباتی در قالبی پارامتریک مد نظر قرار گرفت. در انتها، لازم به ذکر است که 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 آب، این دو عامل در همه فرآیندهای مدل‌یابی و بهینه‌سازی ثابت در نظر گرفته شدند. پیشنهاد می‌شود که در آینده، مدل‌یابی و بهینه‌سازی بر مبنای تغییرات تعداد طبقات و مساحت زیربنای ساختمان صورت پذیرد. همچنین، پیشنهاد می‌شود مدل‌یابی و بهینه‌سازی بر مبنای سیستم‌های دیگر ساختمانی مورد استفاده در شهر تهران نیز صورت پذیرد.

نتیجه‌گیری

مشخصات هندسی مسکن آپارتمانی، تاثیر قابل توجهی بر عملکرد آب ساختمان و به تبع آن بر مصرف آب جهانی دارد.

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 خانم زکیه سادات حسینی است

سهم نویسندگان: زکیه سادات حسینی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۴۰٪)؛ سیدمجید مفیدی شمیرانی (نویسنده دوم)، تعریف نگارنده مقدمه/روش‌شناس (۳۰٪)؛ راضیه لبیب زاده (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- Abbasi M, Tabesh M, Shahangian SA, Safarpour H (2025). Enviro-technical assessment of social responses to water demand management policies facing water scarcity. Journal of Water Resources Planning and Management. 151(8):04025030.
- Ahmadi J, Maddahi SM, Mirzaei R (2023). Generative design of housing spatial layout based on rectangular spaces. Advances in Civil Engineering. 2023(1):1142371.
- Antão-Geraldes AM, Pinto M, Afonso MJ, Albuquerque A, Calheiros CSC, Silva F (2023). Promoting water efficiency in a municipal market building: A case study. Hydrology. 10(3):69.
- Ataman C, Dino İG (2022). Performative design processes in architectural practices in Turkey: Architects' perception. Architectural Engineering and Design Management. 18(5):690-704.
- Borah G (2025). Urban water stress: Climate change implications for water supply in cities. Water Conservation Science and Engineering. 10(1):20.
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan TAMT (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 6(2):182-197.
- Deslatte A, Koebele EA, Wiechman A (2025). Embracing the ambiguity: Tracing climate response diversity in urban water management. Public Administration. 103(1):250-272.
- Dino IG (2016). An evolutionary approach for 3D architectural space layout design exploration. Automation in Construction. 69:131-150.
- Dino IG, 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.
- Fattahi Tabasi S, Rafizadeh HR, Andaji Garmaroudi A, Banihashemi S (2023). Optimizing urban layouts through computational generative design: Density distribution and shape optimization. Architectural Engineering and Design Management. 20(5):1164-1184.
- Guo ZJ, Yu J, Zhang YZ, Zhang J, Chen Y, Wu Y, et al (2017). Water-stable in (III)-based metal-organic frameworks

and agent-based modeling: A hybrid approach. Journal of Building Engineering. 47:103822.
- Saemian P, Tourian MJ, AghaKouchak A, Madani K, Sneeuw N (2022). How much water did Iran lose over the last two decades?. Journal of Hydrology: Regional Studies. 41:101095.
- Sharma AK, Chani PS (2024). Embodied water-energy nexus towards sustainable building construction: Case of conventional Indian houses. Journal of Building Engineering. 83:108453.
- Su P, Lu W, Chen J, Hong S (2024). Floor plan graph learning for generative design of residential buildings: A discrete denoising diffusion model. Building Research & Information. 52(6):627-643.
- Thebuwena ACHJ, Samarakoon SSM, Ratnayake RC (2024). On the necessity for improving water efficiency in commercial buildings: A green design approach in hot humid climates. Water. 16(17):2396.
- Wang B, Lu W, Zhang Y (2025). A graph-enabled parametric modeling approach for façade layout generative design. Journal of Building Engineering. 105:112481.
- Xia T, Ledbetter A, Bobe A, Hofland J, Krouwels B, Wang T, et al (2024). Interactive AI for generative housing design based on graph neural networks and deep generative models. Proceedings of the 2024 European Conference on Computing in Construction. Brussels: European Council on Computing in Construction (EC3). p. 469-477.
- Yan S, Wu C, Zhang Y (2025). Generative design for architectural spatial layouts: A review of technical approaches. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. Latest Articles:1-21.
- Yi H (2016). User-driven automation for optimal thermal-zone layout during space programming phases. Architectural Science Review. 59(4):279-306.
- Yong L, Chibiao H (2022). A generative design method of building layout generated by path. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. 7(2):825-848.
- Zhang J, Liu N, Wang S (2021). Generative design and performance optimization of residential buildings based on parametric algorithm. Energy and Buildings. 244:111033.
with rod-shaped secondary building units: Single-crystal to single-crystal transformation and selective sorption of C2H2 over CO2 and CH4. Inorganic Chemistry. 56(4):2188-2197.
- He C, Liu Z, Wu J, Pan X, Fang Z, Li J, et al (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. Nature Communications. 12(1):4667.
- Hosseinian SM, Ghahari SM (2021). The relationship between structural parameters and water footprint of residential buildings. Journal of Cleaner Production. 279:123562.
- Hosseinian SM, Sabouri AG, Carmichael DG (2023). Sustainable production of buildings based on Iranian vernacular patterns: A water footprint analysis. Building and Environment. 242:110605.
- Kamazani MA, Dixit M, Shanbhag SS (2024). Interdependencies and tradeoffs in embodied and operational energy use, carbon emissions, and embodied water use of buildings. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1363(1):012024.
- Keshavarzi M, Rahmani-Asl M (2021). Genfloor: Interactive generative space layout system via encoded tree graphs. Frontiers of Architectural Research. 10(4):771-786.
- Li Z, Li S, Hinchcliffe G, Maitless N, Birbilis N (2024). Automated architectural space layout planning using a physics-inspired generative design framework. arXiv:2406.14840 [Preprint]. 2024 [cited 2025 Nov 20]. Available from: https://arxiv.org/abs/2406.14840
- Liu S, Zhou L (2025). LayoutGAN for automated layout design in graphic design: An application of generative adversarial networks. Informatica. 49(10).
- Liu Z, Zhang C, Guo Y, Osmani M, Demian P (2019). A building information modelling (BIM) based water efficiency (BWe) framework for sustainable building design and construction management. Electronics. 8(6):599.
- Pradeep T, Tam MK, Serrano JF (2024). Managing water, the mother of resources: Thoughts on world water day 2024. ACS Sustainable Resource Management. 1(3):368-369.
- Rahbar M, Mahdavinejad M, Markazi AH, Bemanian M (2022). Architectural layout design through deep learning