جلالی سرج ف. و همکاران
خرداد ۱۴۰۶
اقتصاد و برنامه ریزی شهری
دوره ۸، شماره ۳

ارزیابی اثرات بهسازی انرژی ساختمان‌های شهری بر مصرف انرژی، انتشار آلاینده‌ها و عملکرد اقتصادی با استفاده از مدل‌سازی انرژی شهری (UBEM)

فرهود جلالی سرج[۱]؛ حسن دارابی[۲*]؛ عبدالرضا کرباسی[۳]؛ محمدجواد امیری[۴]

۱. گروه برنامه‌ریزی محیط زیست، پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تهران، ارس، ایران
۲. گروه مهندسی طراحی محیط زیست، دانشکدهٔ محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکدهٔ محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۴. گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط زیست، دانشکدهٔ محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۷/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۹

چکیده

از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در رشد افسارگسیخته و روزافزون شهرنشینی در بخش ساختمان، افزایش مصرف انرژی است. مدیریت این موضوع نیازمند به‌کارگیری رویکردهای کارآمد ارزیابی و بهینه‌سازی مصرف انرژی است. این مطالعه با هدف ارائهٔ چارچوبی یکپارچه برای ارزیابی هم‌زمان عملکرد انرژی، پیامدهای محیط زیستی و شاخص‌های اقتصادی در ساختمان‌های شهری شهر قزوین با تلفیق مدل‌سازی انرژی شهری (UBEM) و الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان انجام شده است. مدل‌سازی از رویکرد نمونه‌محور (Prototype-based UBEM) بهره گرفته و کالیبراسیون مدل با داده‌های واقعی مصرف انرژی انجام پذیرفته است (CV(RMSE)= 3.4%, MAPE=3.3%). نتایج نشان داد اجرای سناریوی جامع بهینه‌سازی، مصرف انرژی ساختمان نمونه را تا ۴۶/۵ درصد کاهش می‌دهد. با تعمیم نتایج به ساختمان‌های مسکونی، تجاری و اداری هم‌تیپ در سطح شهر، سالانه بین ۶۴۸ تا ۷۹۲ گیگاوات‌ساعت صرفه‌جویی انرژی محقق می‌شود. این امر به کاهش مطلق انتشار سالانهٔ آلاینده‌های CO_2 به میزان ۱۲۵ هزار تن، SO2 به میزان ۳۹۰ تن، NOx به میزان ۳۹۰ تن و PM2.5 به میزان ۹۶ تن می‌انجامد. تحلیل حساسیت یک‌طرفه نشان داد ضریب انتقال حرارت پوسته بیشترین تأثیر را بر مصرف انرژی شهری و قیمت حامل‌های انرژی بیشترین اثر را بر شاخص ارزش فعلی خالص دارد. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که چارچوب پیشنهادی می‌تواند برای ارزیابی هم‌زمان پیامدهای انرژی، محیط زیستی و اقتصادی سناریوهای بهسازی ساختمان‌های شهری مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی

ارزش فعلی خالص (NPV)
انتشار آلاینده‌ها
بهینه‌سازی انرژی
تحلیل حساسیت
ساختمان نمونه
مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

* نویسندهٔ مسئول: darabih@ut.ac.ir

COPYRIGHTS

©2027 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Jalali Serej F. Darabi H. Karbassi A. Amiri M.J. Assessing the effects of urban building energy retrofits on energy consumption, pollutant emissions, and economic performance using urban building energy modeling (UBEM). *Urban Economics and Planning* 8(3):62-75.

DOI: 10.22034/uep.2026.597635.1990

۱. مقدمه

در پی رشد شهرنشینی و افزایش سطح زیربنای ساختمان‌ها، بخش ساختمان به یکی از مصرف‌کنندگان بزرگ انرژی و منابع انتشار آلاینده‌ها تبدیل شده است (UNEP & GlobalABC, 2024). سیر نزولی مصرف انرژی در ساختمان‌ها ضمن کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، نقش کلیدی در بهبود کیفیت هوای شهری و ارتقای امنیت انرژی ایفا خواهد کرد (IEA, 2024; Kong et al. 2023). شهر سیستمی پیچیده و درهم‌تنیده است که از جریان‌های انرژی و مواد، زیرساخت‌ها، فعالیت‌های انسانی و محیط بنا شده است. لذا هرگونه تغییر در یک بخش سیستم می‌تواند بر عملکرد سایر بخش‌های سیستم اثرگذار باشد (Zhang, 2013; Zhang et al., 2015). در این‌میان، ساختمان‌ها بخش کالبدی و به نوعی، بنیادین این سیستم را شکل می‌دهند و از سوی دیگر، یکی از کانون‌های اصلی تقاضای انرژی به شمار می‌روند (Salvalai et al., 2024). مشخص است که عملکرد انرژی ساختمان‌ها، از تعامل ویژگی‌های کالبدی و فنی، نوع کاربری، الگوی بهره‌برداری با شرایط اقلیمی و محیطی از یک‌سو و سامانهٔ تأمین انرژی سوی دیگر تأثیر می‌پذیرد (Boccalatte et al., 2020). همین امر باعث می‌شود تا هر گونه تغییر عملکرد انرژی ساختمان‌های وضع موجود فقط به تغییر تقاضای انرژی منتهی نشوند، بلکه ضمن تأثیرپذیری از محیط، باعث انتشار آلاینده‌ها بوده و بر هزینه‌های مرتبط با محیط نیز اثرگذار باشند (Xu et al., 2018). شکل‌گیری این درهم‌کنش برای یک سیستم پیچیدهٔ شهری، موضوع انرژی ساختمان را از واحدی منفرد، به بخشی از عملکرد سیستم شهری مبدل می‌کند. بر همین‌اساس، تحلیل در مقیاس ساختمان وضع موجود و سپس، بررسی در مقیاس شهری و درنهایت، فراهم کردن بنیان‌های لازم و در عین حال مرتبط با اهداف برنامه‌ریزی و مداخلهٔ شهری، امری الزامی است (Johari et al., 2020; Ang et al., 2020).

در چارچوب سیستم‌های پیچیده، مدل‌سازی انرژی ساختمان در مقیاس شهری (UBEM) یکی از ابزارهایی به شمار می‌رود که می‌تواند امکان کمی‌سازی از یک جزء خرد سیستم، تا بررسی در مقیاس شهر را فراهم سازد و شرایط تحلیل رابطه میان ساختمان وضع موجود و میزان تقاضای انرژی آن را ایجاد کند. براساس میزان تجمیع داده‌ها و شیوهٔ بازنمایی ساختمان‌ها می‌توان رویکردهای UBEM را دسته بندی کرد. در این حوزه دو رویکرد پایین به بالا و بالا به پایین قابل شناسایی است. در رویکردهای پایین به بالا، از ساختمان‌های نمونه یا تیپ‌های ساختمانی (archetype/prototype) برای بازنمایی ساختمان‌های شهری استفاده می‌شود. به‌خصوص، هنگامی که محدودیت داده‌های تفصیلی وجود دارد و قرار است این کار با هزینهٔ محاسباتی کمتر صورت گیرد، رویکرد پایین به بالا استفاده می‌شود. بدیهی است که میزان دقت نتایج به کیفیت تیپ‌بندی و میزان نمایندگی ساختمان‌های منتخب وابسته است (Reinhart & Cerezo Davila, 2016; Shen & Wang, 2024). در رویکردهایی که تحت عنوان «بالا به پایین» شناخته می‌شوند، برآورد مصرف انرژی ساختمان‌ها به استفاده از داده‌های تجمیعی و روابط آماری در مقیاس کلان متکی است. بدیهی است که در این چارچوب قابلیت بازنمایی جزئیات فیزیکی و سناریوهای مداخله در سطح ساختمان چندان قابلیت گسترش و توسعه نخواهند داشت (Reinhart & Cerezo Davila, 2016).

با توجه به ماهیت UBEM چند امکان شکل می‌گیرد که عبارت‌اند از: ۱) امکان انتقال تحلیل از ساختمان منفرد به مجموعه ساختمان‌ها؛ ۲) امکان برآورد عملکرد انرژی در مقیاس فراتر از ساختمان؛ ۳) امکان ارزیابی اثرات مداخلات ذیل سناریوهای متفاوت بهینه‌سازی (Johari et al., 2020; Ang et al., 2020). با همهٔ این اوصاف، نباید فراموش کرد که این مدل بخشی از سیستم شهری در چارچوب تحلیل‌های انرژی ساختمان را مدل سازی می‌کند؛ به این معنا که برای رسیدن به تصمیم‌گیری در سطح شهری و دریافت خروجی‌های تصمیم‌گیری نیاز است که تا رابطهٔ متناسب با سایر مؤلفه‌های شهری و همچنین، پیامدهای آن بر سایر زیرمجموعهٔ شهر، برقرار شود (Ali et al., 2020).

در صورتی که این سیستم پذیرفته شود، آن‌گاه مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، نوعی مداخلهٔ مبتنی بر قانون تلقی خواهد شد که می‌کوشد در دستورالعمل‌های سیستماتیک ساختمان، انرژی را مدیریت کند. همچنین با نگاه فراتر از آن، بر محیط شهری نیز اثرگذار خواهد بود. در این مبحث به صورت مستقیم، الزاماتی در رابطه با پوسته، تأسیسات مکانیکی و الکتریکی، شاخص‌های عملکرد، کاهش نیاز و مصرف انرژی ساختمان تعیین شده است (Ministry of Roads and Urban Development 2020). دامنهٔ این مداخله به عرصه‌های دیگر مانند: تقاضای انرژی ساختمان، انتشار آلاینده‌ها و هزینه‌های مرتبط با آن در راستای، سلامت و رفاه بسط داده می‌شود (IEA, 2024; Johari et al., 2020). این موضوع باعث شده است تا مطالعات شکل‌گرفته در عرصهٔ مبحث ۱۹، بیشتر بر الزامات منطبق با این مبحث و یا عملکرد انرژی ساختمان متمرکز باشد (Arab, 2020; Kazemi, 2017; Kazemipouran et al., 2020). این نوع نگرش و تأکید مستقیم بر بحث مبحث ۱۹ و یا عملکرد انرژی به تمرکز به یک جزء از سیستم کلان‌شهری بدون توجه به روابط و درهم‌کنش آن‌ها با محیط شهری، تبدیل شده است. در این راستا، سه سطح «انرژی ـ محیط زیست ـ اقتصاد» در یک نظام شهری کمتر کانون توجه محققانی بوده که بر مبحث ۱۹ و کارایی انرژی تمرکز داشته‌اند.

بر این‌اساس، زمانی می‌توان ارزیابی دقیق و عمیق درعین‌حال جامع‌تری از عملکرد انرژی ساختمان داشت که نخست این موضوع در مقیاس شهری بررسی شود. دوم، در این بررسی تلاش شود تا تصویری جامع‌تر از پیامدهای یک مداخلهٔ مقرراتی ارائه شود؛ تصویری که فقط به واحدهای زیرمجموعهٔ خرد یک سیستم اکتفا نکند. سوم، گام را از تغییر مصرف انرژی فراتر بگذارد و بتواند پیامدهای محیط زیستی آن را به تصویر بکشد. همچنین، در صورتی که اثرات اقتصادی آن نیز مد نظر قرار گیرد، آن‌گاه می‌توانند زنجیره‌ای از تحلیل مبتنی بر تغییر مصرف انرژی به تغییر در انتشار، سپس هزینه‌های محیط زیستی مرتبط را نشان دهد. در کنار آن، پرداختن به اثرات اقتصادی مداخله می‌تواند در توجیه‌پذیری اقتصادی مؤثر باشد. این استدلال بر سه عامل «عملکرد انرژی، پیامدهای محیط زیستی و ارزیابی اقتصادی» مبتنی است که می‌تواند به عنوان یک سطح مکمل از تحلیل‌های منفرد مد نظر قرار گیرد. بررسی ادبیات و پیشینهٔ تحقیق در چارچوب انتقادی نشان خواهد داد مطالعات قبلی، این سه سطح را چگونه پوشش داده و آن‌ها را به هم متصل کرده‌اند.

۲. پیشینهٔ نظری و تجربی

به منظور بررسی پیشینهٔ پژوهش مطالعات مرتبط در دو بخش ارائه

می‌شود: الف) ادبیات توسعهٔ مدل‌سازی انرژی ساختمان؛ ب) مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان. هر بخش به‌تفکیک مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱.۲. ادبیات توسعهٔ مدل‌سازی انرژی ساختمان

بررسی ادبیات توسعهٔ مدل‌سازی انرژی ساختمان در مقیاس شهری، نشان‌دهندهٔ گسترش دسترسی به منابع داده‌های مکانی؛ افزایش، خودکارسازی تولید مدل‌های متنوع و همچنین به‌کارگیری آن‌ها، تحول مدل‌سازی از تک‌بنا به سمت عرصه‌های شهری (Reinhart & Cerezo Davila, 2016; Chen et al., 2017) و همراهی آن با انواع سناریوهای توسعه بوده است (Ang et al., 2020). در این‌میان، UBEM ازجمله مدل‌های کاربردی است که از آن برای تخمین تقاضای انرژی، در ارزیابی راهبردهای کاهش کربن، طراحی و برنامه‌ریزی شهری و تحلیل سناریوهای مداخله استفاده می‌شود (Ang et al., 2020; Shu & Zhao, 2023). در همین‌راستا، چن و همکاران (۲۰۱۷) با هدف صرفه‌جویی انرژی و هزینه با توسعهٔ City BES و تولید خودکار، مدل‌های Energy Plus را بر پایهٔ داده‌های شهری برای ۹۴۰ ساختمان اداری و تجاری در سان‌فرانسیسکو سناریوهای مختلف بهسازی را ارائه و ارزیابی کرده‌اند. ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) طی پژوهشی مدل انرژی را با ترکیب داده‌های GIS، روش‌های خوشه‌بندی و ساختمان‌های archetype، برای ۵۹,۳۳۲ ساختمان در شهر چانگشا بسط دادند. آن‌ها این مدل‌سازی را برای ارزیابی مداخلات مورد نظر در صرفه‌جویی انرژی در مقیاس شهری نشان دادند. ابوالحسنی و همکاران (۲۰۲۲) طی پژوهشی در شهر مونترآل با استفاده از CityGML، انتخاب خودکار archetype و Energy Plus، یک UBEM ارائه کردند. آن‌ها بر نقش ویژگی‌های بهره‌برداری ساختمان در تقاضای انرژی منطقه‌ای تأکید زیادی داشتند. در تداوم این مطالعات، از UBEM استفاده شده و در تلفیق با مدل شبکهٔ برق، اثر سناریوهای بهسازی گستردهٔ ساختمان وضع موجود نه‌تنها بر انرژی، بلکه بر سایر زیرساخت‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است (Johari et al., 2024). با این‌حال، توسعهٔ مدل در مقیاس شهری بدون چالش نیز نخواهد بود. مسائلی مانند محدودیت دسترسی به داده‌های هندسی و غیرهندسی، تعیین ویژگی‌های بهره‌برداری و سامانه‌های ساختمان و همچنین، اعتبارسنجی و کالیبراسیون تعداد زیاد ساختمان ازجمله چالش‌هایی است که این مدل با آن مواجه است (Wang et al., 2022). وقتی چنین شرایطی پیش می‌آید معمولاً راه حل آن دسته‌بندی ساختمان‌های موجود به تیپ‌های مشخص و استفاده از ساختمان‌های نمونه برای مدل‌سازی است. این امر مدل‌سازی پایین به بالا خوانده شده و هزینهٔ محاسباتی را به‌شدت کاهش می‌بخشد. در این مدل‌سازی‌ها به موضوعاتی مانند اعتبار نتایج به نحوهٔ تعریف تیپ‌ها، کیفیت داده‌های ورودی و کالیبراسیون وابستگی وجود دارد که قاعدتاً توجه ویژه‌ای را نیز می‌طلبد (Shen & Wang, 2024). بررسی این مطالعات دلالت بر آن دارد که توسعهٔ UBEM با گذشت زمان در حال گذار از مقیاس ساختمان به شهر است. این مسئله ظرفیت ارزیابی سناریوهای بهسازی را بهبود داده، اما موضوعی که همچنان قابل توجه است وابستگی اعتبار تعمیم نتایج به کیفیت تیپ‌بندی و داده‌های ورودی است. ضمن اینکه گذار در مقیاس مدل‌سازی به معنای بررسی نظام‌مند پیامدهای انرژی، انتشار آلاینده‌ها و عملکرد اقتصادی به صورت هم‌زمان نیست.

۲.۲. مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

در حوزهٔ مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، چارچوب الزامات صرفه‌جویی و بهبود عملکرد انرژی ساختمان را ارائه می‌کند. در این راستا به‌تدریج مطالعاتی مرتبط با ارزیابی ابعاد مختلف، از انطباق فنی تا شبیه‌سازی و ارزیابی اثرات آن انجام شده است. فیاض و کاری (۲۰۰۹) مبحث ۱۹ را با چند استاندارد بین‌المللی و ارزیابی ساختمان‌های مسکونی ایران همراه با نیم نگاهی به قابلیت‌ها و محدودیت‌های آن مقایسه کرده‌اند. کردجمشیدی (۲۰۲۰) ۳۸۴ واحد مسکونی در بابلسر را در هشت تیپ ساختمانی ارزیابی کرده و این ارزیابی را به سطح تیپولوژی مسکن محدوده تعمیم داده است. مطالعهٔ یادشده تفاوت عملکرد حرارتی تیپ‌ها را با الزامات مبحث ۱۹ ارائه می‌دهد. در همین راستا، سلطانی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۱) یک ساختمان آموزشی در کرمان مدل‌سازی کرده‌اند. بر اساس داده به‌دست‌آمده، ساختمان‌ها براساس میزان صرفه‌جویی انرژی مبتنی بر مقررات ملی ساختمان و پیامدهای محیط زیستی دسته‌بندی شده‌اند. توکلان و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی و تلفیق شبیه‌سازی با شاخص‌هایی مانند دورهٔ بازگشت تنزیل‌شده و اثر سیاست‌های قیمت انرژی پرداخته‌اند.

گرایش اصلی این بخش از مطالعات به سمت‌وسوی مباحث فنی است، اگرچه به‌تدریج و با گذشت زمان مؤلفه‌های دیگر مانند مؤلفه‌های اقتصادی و محیطی نیز وارد این مباحث شده است، اما بیشتر مطالعات هنوز روی تک‌بنا متمرکز هستند یا حداکثر تعدادی ساختمان را بررسی کرده و کمتر به موضوع سیستم شهری و یکپارچه با در نظر گرفتن، ابعاد مختلف سیستم درهم‌تنیدهٔ شهری از دیدگاه عملکرد انرژی ساختمان ورود کرده‌اند. این در حالی است که در مطالعات بین‌المللی این نوع پژوهش‌ها از ارزیابی تک‌بعدی به سمت مطالعات تلفیقی حرکت کرده‌اند و در این بین نیز برخی مطالعات پیامدهای محیط زیستی و اقتصادی را هم ترکیب کرده‌اند. به عنوان مثال، سوپا و بالرینی (۲۰۲۳) نشان دادند سناریوهای بهسازی ضمن اینکه بحث مصرف انرژی و انتشار را پیگیری می‌کنند، این موضوع را با هزینه‌های مداخله و بازده اقتصادی پیوند می‌زنند. در مطالعهٔ UBEM لو و همکاران (۲۰۲۵) مباحث چندگانه‌ای شامل بهینه‌سازی چندهدفه و تحلیل عدم‌قطعیت، سناریوهای بهسازی مبتنی بر مصرف انرژی، انتشار کربن و هزینهٔ چرخهٔ عمر را پیگیری کرده‌اند. در پژوهشی جدیدتر، همین مورد رخ داده، با این تفاوت که موضوع به مقیاس ناحیه، تسری داده شده است (Suppa et al., 2026). البته، به این معنا نیست که در پژوهش‌های داخلی تحلیل چندبعدی وجود ندارد، اما این تلفیق‌ها کمتر از مجموعهٔ ساختمان‌ها، پا را فراتر گذاشته‌اند. نمونهٔ آن، مطالعهٔ توکلان و همکاران (۲۰۲۲) است که انرژی و شاخص‌های اقتصادی بهسازی را در یک واحد ساختمانی تلفیق کرده‌اند. در پژوهشی دیگر، مصطفی‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) بهسازی ساختمانی مسکونی در تهران علاوه بر انرژی موضوع انتشار CO_2، هزینهٔ چرخهٔ عمر و آسایش حرارتی را هم بررسی کرده‌اند. بنابراین، بررسی پژوهش‌های مرتبط نشان می‌دهد ادبیات بین‌المللی به سمت تلفیق انرژی، محیط زیست، اقتصاد در مقیاس‌های بزرگ‌تر و به طور اخص مقیاس شهری در حال حرکت است، اما این روند و مطالعات تلفیقی محدودتر و عمدتاً متکی بر ساختمان بوده و کمتر به مقیاس شهر وارد شده‌اند. به صورت مشخص، باید گفت که با وجود مطالعات متعدد دربارهٔ UBEM و ارزیابی عملکرد انرژی ساختمان، چارچوبی

کـه الزامـات مقررات انرژی سـاختمان را بـه پیامدهای کمـی در مقیاس شـهری و در سـه بعـد انـرژی، محیـط زیسـت و اقتصـاد متصـل کنـد، همچنان محدود است.

مـروری بـر ادبیـات موضـوع، دلالـت بـر آن دارد که توسـعهٔ مدل‌سـازی انـرژی سـاختمان ضمـن افزایش مقیـاس، ابعـاد مختلـف را تلفیق کرده و بخشـی از سیسـتم شـهری را نیز مـورد توجه قرار داده و بـر پیامدهای حاصـل از عملکـرد انـرژی تمرکـز کـرده اسـت. مطالعـات مؤخـر، ضمن ورود بـه عرصـهٔ شـهری، گاه ابعـاد تـازه‌ای مانند ابعـاد اجتماعـی را وارد سـناریوهای خـود کـرده و فراتـر از سـاختمان در مقیـاس محـلات و سـاختار شـهری موضـوع را بررسـی کرده‌انـد (Excell et al., 2024). ضمـن اینکـه موضوعاتـی ماننـد چرخـهٔ عمـر، پیونـد مباحـث مصـرف انـرژی بـا پیامدهای محیط زیسـتی در بخش قابل توجهـی از پژوهش‌ها مـورد توجه قـرار گرفتـه اسـت (Li & Feng, 2025). در مطالعات داخلی نیـز نمونه‌هایـی از تلفیـق انـرژی با اقتصاد، انتشـار و اقلیم آسـایش قابل مشـاهده اسـت. امـا وجه تمایز آن بـا مطالعات بین‌المللـی در مقیاس آن و ابعـاد موضـوع مـورد بررسـی اسـت (Tavakolan et al., 2022). آنچـه اهمیـت دارد صـرف ورود بـه ابعـاد مختلـف ماننـد اقتصـاد یـا محیـط زیسـت نیسـت، بلکـهٔ مسـئلهٔ بنیادیـن گسسـت در نحـوهٔ پیوسـتگی تحلیـل در مقیـاس از یـک سـو و چگونگـی ارزیابـی ابعـاد بـه صـورت درهم‌کنـش متأثـر از مقیـاس اسـت. اگرچه چارچـوب و الزامـات قانونی مداخلـه در کشـور فراهـم اسـت، امـا در اینکـه ایـن الزامـات چگونـه به سـناریوهایی تبدیـل شـود کـه در مقیاس شـهری مورد توجه قـرار گیرد و ابعـاد متفـاوت را یکپارچـه کنـد، خـلأ جـدی مشـاهده می‌شـود. لـذا می‌تـوان بـه ایـن شـیوه بیـان کـرد کـه خـلأ در جهت‌گیـری پژوهشـی مرتبـط بـا ایـن حـوزه در پیونـد نظام‌منـد مقـررات، عملکـرد انـرژی، محیـط زیسـت، اقتصـاد در مقیـاس سـاختمان‌های شـهری اسـت. آنچه مشـخص اسـت، فقـدان چارچوبـی اسـت کـه الزامـات مبحـث ۱۹ را به سـناریوی قابل سـنجش در مقیاس سـاختمان‌های شـهری مـدل کند و ضمـن اینکـه فاصلـهٔ عملکـرد موجـود بـا وضعیـت مـد نظـر مقـررات را مـدل کنـد و در نهایـت، بتوانـد پیامدهای ایـن خلأ را در امتـداد زنجیرهٔ انرژی، انتشار و اقتصاد مورد ارزیابی قرار دهد.

پژوهـش حاضـر در پاسـخ بـه ایـن خلأ، می‌کوشـد تـا بتوانـد مبحث ۱۹ را بـه عنـوان چارچوب مرجع مداخلـه و UBEM نمونه‌محـور را به عنوان ابـزار کمی‌سـازی آن در مقیـاس سـاختمان‌های وضـع موجـود کنـد. بر این‌مبنـا، تـلاش می‌شـود تـا سـاختمان‌های مسـکونی، تجـاری و اداری شـهر قزویـن براسـاس تیپولوژی سـاختمانی مدل‌سـازی شـوند و فاصلهٔ میـان وضعیـت موجـود و سـناریوی منطبـق بـا الزامـات مبحـث ۱۹ مدل‌سـازی و محاسـبات کمـی انجـام شـود. نتیجـهٔ کار از سـه زاویـهٔ عملکـرد انـرژی، پیامدهای انتشـار و شـرایط اقتصادی اجرای سـناریوی بهینه‌سـازی مـورد ارزیابـی و تحلیـل قرار می‌گیـرد. بر همین‌اسـاس نیز پژوهـش حاضـر بـا به‌کارگیـری رویکـرد تیپولـوژی سـاختمانی و مدل‌سـازی نمونه‌محور، به دنبال پاسـخگویی به این سـه مسـئله اسـت: ۱. خـلأ کمـی بیـن شـدت مصرف موجـود و اجـرای الزامـات مبحث ۱۹ در سـاختمان‌های مسـکونی، تجـاری و اداری چـه میزان اسـت؟ ۲. این خـلأ چـه بـار اضافـی از آلاینده‌های محلـی و هزینه‌هـای خارجی مرتبط بـا آن را بـر شـهر تحمیـل می‌کنـد؟ ۳. تغییـر شـرایط اقتصـادی چـه اثـری بـر توجیه‌پذیـری سـناریوی منطبـق با مبحـث ۱۹ دارد و مشـوق مالی چه نقشی در بهبود جذابیت اقتصادی آن می‌تواند ایفا کند؟

۳. روش پژوهش

۱.۳. چارچوب پژوهش

جامعـهٔ آمـاری ایـن پژوهـش شـامل سـاختمان‌های مسـکونی، تجاری و اداری شـهری متناسـب بـا منابـع آمـاری شـهرداری قزویـن و سـازمان نظـام مهندسـی سـاختمان اسـتان قزویـن اسـت. بـرای مواجهـه بـا محدودیـت داده‌هـا، از رویکـرد تیپولوژی اسـتفاده شـد. سـاختمان‌ها بر اسـاس سـه معیـار الـف: کاربـری (مسـکونی، تجـاری و اداری)؛ ب: دورهٔ سـاخت (از ۱۳۸۵ تـا کنـون)؛ ج: تعـداد طبقات به ۳ گروه اصلی تقسـیم شـدند. سـپس، ویژگی‌هـای هندسـی، پوسـته و سـامانه‌های تأسیسـاتی بـرای تعییـن همگنـی درون هر تیـپ و انتخاب سـاختمان نماینده مورد اسـتفاده قـرار گرفـت. برای هر گروه چند سـاختمان نمونه که بیشـترین تشـابه هندسـی، سـازه‌ای و تأسیسـاتی بـا گروه خـود داشـته‌اند انتخاب شـد. مشـخصات فنی سـاختمان‌های نمونه‌های اصلی، متوسـط مقیاس، ۵ سـقف بـا زیربنـای بیـش از ۶۰۰ مترمربـع بـرای کاربری مسـکونی؛ ۲ سـقف بـا زیربنـای بیشـتر از ۴۰۰ مترمربـع بـرای کاربـری تجـاری و ۴ سـقف بـا زیربنای بیـش از ۲۰۰ مترمربع بـرای کاربـری اداری به عنوان مبنا در شبیه‌سازی قرار گرفتند.

بـرای انتخـاب سـاختمان‌های نمونـه از میان هـر تیپ، از معیـار ترکیبی (میانگیـن هندسـی+بیشـترین فراوانـی) اسـتفاده شـد؛ بـه این‌صورت که ابتـدا پرتکرارتریـن محـدودهٔ مسـاحت، تعداد طبقات و سـال سـاخت در هـر تیـپ مشـخص شـد. سـپس، سـاختمانی کـه مشـخصات آن بـه میانگیـن هندسـی پارامترهـای یادشـده نزدیک‌ترین فاصله را داشـت، به عنـوان سـاختمان نمونـه انتخاب شـد. ایـن روش، هم نماینـدگـی آماری (بیشـترین فراوانـی) و هم مرکزیـت توزیع داده‌ها (میانگین هندسـی) را تأمیـن می‌کنـد و با رویکـرد اسـتاندارد (Tardioli et al.2018) همخوانی دارد.

پژوهـش حاضـر در چهـار مرحلـه عملیاتـی شـده اسـت: (۱) گـردآوری داده‌هـای فنـی، اقلیمـی و مصـرف انرژی سـاختمان‌های شـهری قزوین؛ (۲) توسـعه و کالیبراسـیون مـدل انـرژی نمونـه بـا Design Builder/ Energy Plus براسـاس ASHRAE Guideline14 (ASHRAE, 2020)؛ (۳) تعریـف سـناریوهای پایـه و بهینه‌سـازی مبحـث ۱۹؛ (۴) ارزیابـی یکپارچـهٔ صرفه‌جویـی انـرژی، کاهـش آلاینده‌هـا (CO_2, SO_2, NOx, $PM_{2.5}$) و شـاخص‌های اقتصـادی دورهٔ بازگشـت سـرمایه (Payback Period)، ارزش فعلـی خالـص (NPV) و نـرخ بـازده داخلـی (IRR). این چارچـوب مبتنـی بر رویکـرد نمونه‌محـور (Prototype-based UBEM) است (شکل ۱).



شکل ۱. چارچوب پیشنهادی مبتنی بر UBEM برای ارزیابی یکپارچهٔ انرژی، محیط زیستی و اقتصادی ساختمان‌های شهری

۲.۳. مطالعهٔ موردی و توسعهٔ مدل انرژی شهری (UBEM)

شهر قزوین دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد (BSk) است. با توجه به محدودیت داده‌های تفصیلی در این پژوهش، از رویکرد نمونه‌محور (Prototype-based UBEM) استفاده شد. در این مدل ابتدا یک ساختمان نمونه از سه نوع کاربری، انتخاب، کالیبره و نتایج به ساختمان‌های هم‌تیپ (مسکونی، تجاری و اداری) تعمیم داده شد. داده‌های ورودی شامل مشخصات هندسی، مصالح پوسته، سامانه‌های HVAC، قدمت بنا، الگوی بهره‌برداری و سیستم‌های تأسیساتی (سرمایش، گرمایش) مصرف انرژی در ساختمان‌های (مسکونی، تجاری و اداری) شهر قزوین است. به استناد ادبیات موضوعی و با توجه به فقدان داده‌های تفصیلی در مقیاس تک‌بنا، رویکرد Prototype-based UBEM برای مدل‌سازی انتخاب شد. سپس، ساختمان‌ها بر اساس کاربری، دورهٔ ساخت، تعداد طبقات، ویژگی‌های پوسته و سامانه‌های تأسیساتی در تیپ‌های همگن کلاسه‌بندی شدند. در ادامه برای هر تیپ، ساختمان نماینده با توجه به فراوانی ویژگی‌ها و نزدیکی به مقادیر مرکزی برگزیده شد. سپس، شبیه‌سازی اجرا شد و نتایج هر نمونه فقط به ساختمان‌های واقع در همان دامنهٔ تیپولوژیک تعمیم داده شد. بر این‌اساس، برآورد شهری این پژوهش بیانگر عملکرد ساختمان‌های هدفِ همگن است. امکان مدل‌سازی مستقیم تک‌تک ساختمان‌های شهر وجود ندارد.

جدول ۱. مشخصات ساختاری و فیزیکی تیپ‌های ساختمانی در شهر قزوین

کاربری	کد تیپ	سهم از زیربنا (%)	تعداد کل ساختمان (تخمین)	دامنهٔ میانگین مساحت زیربنا (مترمربع)	دامنهٔ تعداد طبقات	قدمت غالب (سال)	مشخصات پوستهٔ حرارتی	سیستم گرمایش/ سرمایش
مسکونی	T-Res	۶۵%	۱۰۹۲	۶۰۰	۵-۴	۱۳۸۵ تا کنون	دیوار سفال آجری، پنجرهٔ سه‌جداره معمولی- U-VALUE ضعیف	پکیج دیواری/ اسپلیت
تجاری	T-COM	۱۵%	۵۰۴	۴۰۰	۲-۱	۱۳۸۵ تا کنون	جداره‌های شیشه‌ای بزرگ، عایق‌کاری متوسط	سیستم‌های تجمیعی اسپلیت/چیلر
اداری	T-OFF	۲۰%	۵۰۴	۲۰۰	۴-۳	۱۳۸۵ تا کنون	نما شیشه‌ای/ سنگ، فاقد عایق‌کاری، جدارهٔ U-VALUE ضعیف	چیلر تراکمی/بویلر مرکزی

*جامعهٔ آماری این پژوهش، شامل کلیهٔ پروانه‌های ساختمانی صادرشده در شهر قزوین در بازه زمانی ۱۳۸۵ تا کنون (حدود ۲۰ سال) است. بر اساس آمار تجمیعی شهرداری قزوین و سازمان نظام مهندسی ساختمان استان قزوین، میانگین مساحت زیربنای مصوب در این بازه حدود ۱ میلیون و ۷۰۰ هزار مترمربع در نظر گرفته شد. انتخاب این بازه زمانی بلندمدت، به جای یک سال خاص، باعث می‌شود تا نوسانات دوره‌های رکود و رونق ساخت‌وساز در مدل لحاظ شده (مبنا برای ساخت‌وسازهای آیندهٔ شهر باشد) و نتایج تعمیم‌یافته، میانگین وزنی عملکرد ساختمان‌های شهر در دو دههٔ اخیر باشد. نمونه‌های ساختمانی مورد بررسی برای کالیبراسیون مدل، از میان پروژه‌های ساخته‌شده در سال‌های ۱۳۸۵ تا کنون انتخاب شده‌اند تا تنوع روش‌های اجرایی (از سنتی تا نیمه‌مدرن) را پوشش دهند.

۳.۳. کالیبراسیون مدل انرژی

مـدل انـرژی بـا Design Builder 7.0.2 و موتـور Energy Plus 9.1 توسـعه یافـت (Crawley et al., 2001). کالیبراسـیون با داده‌های واقعی مصرف برق و گاز (۱۲ ماه) مطابق ASHRAE Guideline 14 (ASHRAE, 2020) و با اسـتفاده از شـاخص‌های NMBE (معادلـۀ ۱) و CV(RMSE) (معادلـۀ ۲) انجـام شـد. دامنـۀ پذیـرش ایـن شـاخص‌ها بـرای مدل‌های کالیبره‌شـده در سطح ماهانه، به‌ترتیب NMBE<5% و CV(RMSE)<15% اسـت (ASHRAE, 2020; Oraiopoulos & Howard, 2022). معادلـۀ ۱ شـاخص خطـای میانگین نرمال‌شـده را نشـان می‌دهد و آن را محاسـبه می‌کند:

$$NMBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(M_i - S_i)}{(n-p)\bar{M}} * 100$$

در معادلۀ ۱:

M_i: مقدار اندازه‌گیری‌شدۀ مصرف انرژی در دورۀ i

S_i: مقدار شبیه‌سازی‌شدۀ مصرف انرژی در دورۀ i

$\bar{M}$: میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شدۀ مصرف انرژی

n: تعداد داده‌های مورد استفاده در کالیبراسیون

p: تعداد پارامترهای تنظیم‌شدۀ مدل

معادلۀ ۲: ضریب تغییرات ریشۀ میانگین مربعات خطا

$$CV(RMSE)(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(M_i - S_i)^2 / (n-p)}}{\bar{M}} \times 100 \qquad (۲)$$

براسـاس داده‌هـای حاصل از کالیبراسـیون و اعتبارسـنجی مدل (جدول ۱) میـزان NMBE ۰/۸۲ درصـد و مقـدار CV(RMSE) معادل ۳/۴ درصد اسـت. مقادیـر ارائه‌شـده، مبیـن مقـدار کمینه‌تـر از آسـتانۀ پذیـرش توصیه‌شـده در ASHRAE Guideline 14 اسـت. فراینـد کالیبراسـیون متکـی بـه اسـتفاده از ۱۲ مـاه دادۀ واقعـی مصـرف بـرق و گاز سـاختمان‌های نمونـه صـورت گرفـت. مقادیـر NMBE=0.82% و CV(RMSE)=3.4% در محـدودۀ پذیـرش ASHRAE Guideline 14 قرار گرفتنـد. ایـن نتایـج دال بـر تأییـد نتایـج اعتبـار مـدل در مقیـاس سـاختمان‌های نمونـه و دورۀ کالیبراسـیون اسـت. بـا این‌وجـود، بایـد دقـت کرد که داده‌های مسـتقل و تفکیک‌شـده برای کل سـاختمان‌های شـهر وجـود نـدارد. بـر همین‌اسـاس نیـز کالیبراسـیون بـه عنـوان اعتبارسنجی برآوردهای شهری محسوب نمی‌شود.

۴.۳. طراحی سناریوهای بهینه‌سازی انرژی

سـؤال‌های پژوهـش دلالـت بر خـلأ بین وضع موجـود و الزامـات مبحث ۱۹دارد و بـه اسـتناد آن دو سـناریوی اصلـی تعریـف شـد: سـناریوی وضعیـت موجـود بـدون اقـدام بهینه‌سـازی و سـناریوی بعـدی اجـرای کامـل مبحـث ۱۹کـه بهبـود عایـق‌کاری پوسـته، پنجره‌هـای Low-E سـه‌جداره، بویلر چگالشـی، سیستم سـرمایش پربازده، روشـنایی LED و سـامانۀ مدیریـت انـرژی را در بـر دارد. ایـن گزینـه عمدتـاً مبتنـی بـر مطالعـات پیشـین در اقلیم‌هـای سـرد (Asadi et al., 2012; Ma et al., 2012; Sadineni et al., 2011) و در چارچـوب الزامـات مبحـث ۱۹ مقـررات ملـی سـاختمان اسـت (National Building Regulations Office 2025)، کـه بـه واسـطۀ آن صرفه‌جویـی انـرژی طبـق معادلـۀ ۳ محاسبه خواهد شد.

$$Energy\ Saving\ \% = \frac{Energy_{Base} - E_{Scenario}}{E_{Base}} * 100 \qquad (۳)$$

EBase: مصرف سالانۀ انرژی ساختمان در وضعیت پایه (Baseline)

EScenario: مصرف سالانۀ انرژی ساختمان در سناریوی بهینه‌سازی

در هـر سـناریو انتشـار آلاینده‌هـای محیطـی و شـاخص‌های اقتصـادی عـلاوه بـر مصـرف انـرژی ارزیابـی شـد و در نهایـت، نتایـج با سـناریوی پایه قیاس شد.

بـرای ارزیابـی اثـرات سـناریوی بهینه‌سـازی ارتقایافته مبتنـی بر مبحث ۱۹ (ویرایش پنجم) تعریف شـد. مقادیر پارامترهای پوسـته و تأسیسـات منطبـق بـر الزامـات گـروه سـاختمان‌های بـا آیتم‌هـای ذیـل در نظـر گرفته شد:

دیوارهـای پیرامونـی: عایـق کاری حرارتـی بـا ضریب انتقـال حرارت w/ m^2k U=0.38 (مطابق جدول الزامات گروه یک مبحث ۱۹)

سقف و بام: اجرای عایق حرارتی $U=0.25w/m^2k$

پنجره‌ها: پنجره‌هـای سـه‌جداره low-E بـا فریـم UPVC و ضریـب $U=1.8w/m^2k$ و SHGC=0.4

سیسـتم حرارتـی (تأسیسـات HVAC): تعویـض بویلـر حرارتـی بـا بویـر چگالشی با بازده ۹۴ درصد و چیلر تراکمی با COP=3.2

سیسـتم روشـنایی و مدیریـت: اسـتفاده از سیسـتم LED و کنتـرل هوشمند روشنایی (BEMS)

جدول ۲. انطباق اقدامات بهینه‌سازی با بندهای مشخص مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

اقدام بهینه‌سازی	بند مرتبط با مبحث ۱۹	مقدار استاندارد (مبحث ۱۹)	مقدار موجود (وضع پایه)	میزان بهبود
عایق‌کاری دیوارهای پیرامونی	بند ۱۹-۴-۱-۱ (جدول الزامات پوسته)	U<= 0.38 W/M2.K	U~1.20 W/M2.K	کاهش انتقال ۶۸%
تعویض پنجره با LOW-E سه‌جداره	بند ۱۹-۴-۱-۳	U<=1.8 W/M2.K & SHGC<=0.4	U~3.5W/M2.K	کاهش انتقال ۴۹%
تعویض بویلر با بویلر چگالی	بند ۱۹-۶-۲-۱	بازده =>۹۴%(LHV)	بازده ~ ۷۵%	افزایش ۲۵% بازده
استفاده از چیلر تراکمی با COP بالا	بند ۱۹-۶-۳-۲	COP>=3.2	2.5 ~ COP	افزایش ۲۸% بازده
سیستم روشنایی LED+BEMS	بند ۱۹-۱۰-۱-۱	چگالی توان =<6 W/M²	چگالی توان ~12 W/M²	کاهش ۵۰% مصرف روشنایی

جدول ۳. طبقه‌بندی سناریوهای بهینه‌سازی مورد استفاده در پژوهش

سناریو	نوع راهکار	هدف اصلی
Baseline	وضعیت موجود	مبنای مقایسه
سناریوهای غیرفعال	بهبود پوستهٔ حرارتی ساختمان	کاهش بار گرمایش و سرمایش
سناریوهای فعال	ارتقای سیستم‌های HVAC و روشنایی	افزایش بهره‌وری انرژی
سناریوهای انرژی تجدیدپذیر و مدیریت مصرف	استفاده از فناوری‌های نوین و کنترل مصرف	کاهش مصرف انرژی و انتشار آلاینده
سناریوی ترکیبی	اجرای هم‌زمان راهکارهای منتخب	دستیابی به بیشترین صرفه‌جویی انرژی

۵.۳. ارزیابی انرژی، محیط زیستی و اقتصادی سناریوهای بهینه‌سازی

بر اساس مصرف برق، گاز طبیعی و ضرایب انتشار بومی‌شده، میزان انتشار آلاینده‌های CO_2، SO_2، Nox و $PM_{2.5}$ محاسبه شد (جدول ۵) و درخور یادآوری است که ضرایب انتشار برق از Peyvandi et al. (۲۰۲۳) و ضرایب گاز از IPCC (۲۰۲۲) به دست آمده است. همچنین، برای ارزش‌گذاری اقتصادی کاهش آلاینده‌ها، از رویکرد هزینه‌های خارجی (External Cost) و روش مسیر اثر (Impact Pathway Approach) به استناد گزارش CE Delft (۲۰۲۴) و گزارش EEA (۲۰۲۴) استفاده شد. شاخص‌های اقتصادی شامل دورهٔ بازگشت سرمایه (PB)، ارزش فعلی خالص (NPV) و نرخ بازده داخلی (IRR) با نرخ تنزیل ۱۰ درصد و دورهٔ ۱۰ساله محاسبه شد (Blank & Tarquin, 2018; Copiello et al., 2017; Fregonara & Ferrando 2023) (معادلات 4، 5 و 6).

CO_2,Electricity = EElectricity × EFElectricity

CO_2,Gas = EGas × EFGas

CO_2,Total = CO_2,Electricity + CO_2,Gas

در این معادلات: EElectricity میزان مصرف سالانهٔ برق ساختمان

EGas: میزان مصرف سالانهٔ گاز طبیعی ساختمان

EFElectricity: ضریب انتشار دی‌اکسید کربن مربوط به برق

EFGas: ضریب انتشار دی‌اکسید کربن مربوط به گاز طبیعی

CO_2,Electricity: انتشار CO_2 ناشی از مصرف برق

CO_2,Gas: انتشار CO_2 ناشی از مصرف گاز طبیعی

CO_2,Total: مجموع انتشار دی‌اکسید کربن

در چارچوب توجیه‌پذیری اقتصادی اجرای سناریوها، پرداختن به برآورد هزینهٔ اولیهٔ اجرایی هر راهکار، میزان صرفه‌جویی سالانهٔ هزینهٔ انرژی نیز محاسبه می‌شود. سه شاخص اقتصادی دورهٔ بازگشت سرمایه (Payback Period)، ارزش فعلی خالص (Net Present Value) و نرخ بازده داخلی (Internal Rate of Return) در ارزیابی اقتصادی سناریوها در تداوم کار محاسبه شد (Blank & Tarquin, 2018). در نهایت، معادلهٔ ۷ برای دورهٔ بازگشت سرمایه، مطابق از نسبت هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه به صرفه‌جویی سالانهٔ هزینهٔ انرژی لحاظ شد.

معادلهٔ ۷ (دورهٔ بازگشت سرمایه):

$$PB = I / S$$

که در آن:

I: هزینهٔ اولیه اجرای سناریوی بهینه‌سازی

S: صرفه‌جویی سالانهٔ هزینهٔ انرژی

به منظور ارزیابی اقتصادی در دورهٔ بهره‌برداری، ارزش فعلی خالص بر اساس جریان‌های نقدی سالانه و نرخ تنزیل مطابق رابطهٔ ۸ محاسبه شد.

معادلهٔ ۸ (ارزش فعلی خالص):

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)} - I$$

در این معادله CF_t: جریان نقدی خالص در سال t

r: نرخ تنزیل

t: دورهٔ زمانی تحلیل اقتصادی

n: طول دورهٔ تحلیل اقتصادی

I: سرمایه‌گذاری اولیه

برای سنجش سودآوری سرمایه‌گذاری از نرخ بازده داخلی استفاده و نتیجه از طریق تعیین نرخ تنزیلی که مقدار ارزش فعلی خالص را برابر صفر می‌کند، مطابق رابطهٔ ۹ محاسبه شد.

معادلهٔ ۹ (نرخ بازده داخلی):

$$\sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - I = 0$$

در این معادله CF_t: جریان نقدی خالص در سال t

IRR: نرخ بازده داخلی پروژه

t: دورهٔ زمانی تحلیل اقتصادی

n: طول دورهٔ تحلیل اقتصادی

I: سرمایه‌گذاری اولیه

ادبیات موضوعی محدودهٔ متداول نرخ تنزیل اجتماعی ۷/۳ تا ۱۵ درصد در کشورهای درحال‌توسعه و نرخ تنزیل ۱۰ درصد با توجه به شرایط اقتصادی ایران، نرخ تورم و نرخ سود تسهیلات پروژه‌های عمرانی، به عنوان مقدار پایه در ارزیابی اقتصادی مد نظر قرار گرفت (Turan & Gurluk, 2024; Mostafazadeh et al., 2023). با هدف سازگاری مطالعات ارزیابی اقتصادی، بهسازی ساختمان‌ها دورهٔ بهره‌برداری پروژه برای محاسبهٔ ارزش فعلی خالص (NPV) برابر ۱۰ سال در نظر گرفته شد (Fregonara & Ferrando, 2023; Copiello et al., 2017). هزینه‌های نگهداری و جایگزینی تجهیزات نیز معادل ۲ درصد هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه در سال مد نظر و محاسبات تحلیل حساسیت نسبت به نرخ تنزیل در محدودهٔ ۱۰ درصد برای بررسی عدم قطعیت نتایج به عمل آمد. ضرایب انتشار آلاینده‌ها بر اساس حامل‌های انرژی مصرفی (برق و گاز طبیعی) از مطالعات معتبر داخلی و بین‌المللی مستند و ضریب انتشار CO_2 برق بر اساس شدت انتشار نیروگاه‌های حرارتی ایران مطابق مطالعه Peyvandi et al. (2023) معادل ۰/۶۲۳ تن CO_2 به ازای هر مگاوات‌ساعت در نظر گرفته شد. ضرایب انتشار NOx،SO_2 و $PM_{2.5}$ نیز بر اساس مطالعات Nazari et al. (۲۰۱۰) و پژوهش‌های به‌روزشده داخلی Peyvandi et al., 2023) تعیین شدند. ضرایب انتشار گاز طبیعی نیز بر مبنای مقادیر پیش‌فرض IPCC (۲۰۲۲) و متناسب با شرایط سوخت مصرفی ایران انتخاب شدند (جدول ۳).

ارزش‌گذاری اقتصادی کاهش انتشار آلاینده‌ها از روش هزینه‌های خارجی انجام گرفت که در آن هزینه‌های خارجی CO_2، SO_2، NOx و $PM_{2.5}$ بر اساس راهنمای CE Delft (۲۰۲۴)، گزارش هزینه‌های خارجی کمیسیون اروپا (Commission, 2019 European) و با اعمال ضرایب تعدیل برای شرایط ایران تعیین شدند. (برای CO_2، هزینهٔ خارجی در بازه ۱۰۰ تا ۱۶۴ یورو به ازای هر تن در نظر گرفته شد و هزینهٔ آلاینده‌های محلی بر اساس رویکرد مسیر اثر (Impact Pathway Approach)، مقادیر مرجع CAFE و داده‌های به‌روزشده EEA (۲۰۲۴) محاسبه شد.

محاسبهٔ ارزش اقتصادی خسارت اجتناب‌شده برای هر آلاینده

$$EC_j = \Delta E_j \times UC_j$$

که در آنارزش اقتصادی خسارت اجتناب‌شده ناشی از آلایندهٔ ،میزان کاهش انتشار آن آلاینده نسبت به سناریوی پایه، وهزینهٔ خارجی واحد آلاینده بر حسب یورو به ازای هر تن است. مجموع منفعت محیط زیستی نیز از جمع ارزش خسارت اجتناب‌شده چهار آلاینده به دست آمد.

جدول ۴. ضرایب انتشار و هزینه‌های خارجی محیط زیستی

آلاینده	ضریب انتشار برق (kg/MWh)	ضریب انتشار گاز طبیعی (kg/GJ)	هزینهٔ خارجی (یورو/تن)	منبع
CO_2	۶۲۳	۵۶/۱	۱۶۴–۱۰۰	Peyvandi et al. (2023); CE Delft (2024); European Commission (2019)
SO_2	۲/۱۵	۰/۰۰۵	۶,۰۰۰–۲,۰۰۰	Nazari et al. (2010); EEA (2024); CE Delft (2024)
NOx	۱/۷۸	۰/۰۴۸	۷,۵۰۰–۲,۵۰۰	Nazari et al. (2010); EEA (2024); CE Delft (2024)
$PM_{2.5}$	۰/۴۷	۰/۰۰۱۵	۵۰,۰۰۰–۱۵,۰۰۰	EEA (2024); CE Delft (2024); WHO (2023)

۶.۳. تحلیل حساسیت و دامنهٔ تغییرات پارامترها

تحلیل حساسیت یک‌طرفه برای سه پارامتر کلیدی (U-value پوسته، قیمت حامل‌های انرژی، ضریب انتشار CO_2 برق) با دامنهٔ تغییرات ۲۰٪± نسبت به مقدار پایه (جدول ۱۰) و دو پارامتر تأثیرگذار نرخ تنزیل و عمر مفید پروژه (جدول ۱۱) انجام شد (Luo et al., 2025; Fennell et al., 2025). هدف نهایی از این تحلیل‌ها، بررسی استواری نتایج مصرف انرژی شهری، کاهش CO_2 و NPV در برابر عدم قطعیت ورودی‌ها و تأثیرگذاری نرخ تنزیل و عمر مفید در حالت بدبینانه بود. در ادامهٔ پژوهش با در نظر گرفتن اینکه تحلیل حساسیت در مدل‌های انرژی شهری که از ابزارهای بررسی اثر عدم قطعیت پارامترهای ورودی و استواری نتایج است، بهره گرفته شد (Tian, 2024; Wang et al., 2025)، در روش تحلیل حساسیت یک‌طرفه، در هر مرحله یک پارامتر تغییر داده شده و بقیه پارامترها در مقدار پایه ثابت نگه داشته می‌شود. در این چارچوب اثر تغییر U-value بر مصرف انرژی، اثر ضریب انتشار برق بر میزان انتشار CO_2 و اثر قیمت انرژی بر NPV تجزیه‌وتحلیل شد. برای تحلیل اقتصادی نیز در سطوح ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و عمر مفید پروژه در سناریوهای ۸، ۱۰ و ۱۵ سال، نرخ تنزیل ارزیابی شد. میزان حساسیت هر خروجی از طریق مقایسهٔ مقدار حاصل در هر سناریو با مقدار متناظر در حالت پایه تعیین شد؛ به نحوی که جهت و میزان تغییر خروجی، مبنای تشخیص پارامترهای اثرگذار و بررسی استواری نتایج قرار گرفت. این تحلیل مستقل از فرایند کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل انرژی ساختمان نمونه، به عنوان ارزیابی حساسیت نتایج به مفروضات ورودی به کار رفت.

۴. نتایج

۱.۴. اعتبارسنجی مدل انرژی ساختمان نمونه

جدول ۶ داده‌های دقت مدل انرژی ساختمان نمونه، با مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی پس از کالیبراسیون با داده‌های واقعی مصرف انرژی مورد ارزیابی را نشان می‌دهد و مبتنی بر داده‌های یادشده، مقدار شاخص NMBE کمتر از ۱ درصد، مقدار CV(RMSE) برابر با ۳/۴ درصد و مقدار MAPE برابر با ۳/۳ درصد است. ضمن اینکه خطای برآورد انتشار دی‌اکسید کربن کمتر از ۲ درصد محاسبه شد. این مقادیر تأیید می‌کنند که مدل، انطباق مناسبی با داده‌های واقعی دارد. در نهایت، با استنتاج از اعتبارسنجی، مدل کالیبره‌شدهٔ قابلیت پذیرش به عنوان مبنای توسعهٔ مدل انرژی شهری و ارزیابی سناریوهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شد.

جدول ۵. نتایج اعتبارسنجی مدل انرژی ساختمان نمونه

شاخص	مقدار	دامنهٔ پذیرش	منبع
NMBE (%)	<۱	<5%	ASHRAE (2020); Oraiopoulos & Howard (2022)
CV(RMSE) (%)	۳.۴	<15%	
MAPE (%)	۳.۳	–	
RMSE (kWh/year)	۷۹۰۰	–	
خطای برآورد انتشار CO_2 (%)	<۲		

۲.۴. نتایج مدل انرژی شهری در سناریوی پایه

اجرای مدل نشان داد الگوی مصرف انرژی متأثر از کاربری‌های مختلف، تفاوت شایان توجهی را به نمایش می‌گذارد. ساختمان‌های تجاری با مقدار ۲۲۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع بیشترین شدت مصرف سالانهٔ انرژی را به خود اختصاص دادند (جدول ۷). برآورد این مقدار برای ساختمان‌های اداری و مسکونی به‌ترتیب ۲۰۰ و ۱۸۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع است. اصلی‌ترین عامل مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی، گرمایش با سهمی برابر ۴۵ درصد است. این نتیجه صورت معکوس در ساختمان‌های تجاری مربوط به سرمایش (۳۵ درصد) و روشنایی (۲۵ درصد) دارد. در ساختمان‌های اداری، گرمایش، سرمایش و روشنایی به‌ترتیب ۳۵، ۳۰ و ۲۰ درصد از مصرف کل انرژی را به خود اختصاص می‌دهند.

ارزیابی مشخصات فیزیکی ساختمان‌ها حکایت از آن دارد که کیفیت عایق حرارتی در ساختمان‌های مسکونی و اداری ضعیف و در ساختمان‌های تجاری در سطح متوسط قرار دارد. این موضوع یکی از عوامل مؤثر بر افزایش مصرف انرژی در شرایط موجود است.

جدول ۶. نتایج سناریوی پایه مدل انرژی شهری

کاربری	شدت مصرف انرژی (kWh/m².year)	گرمایش (%)	سرمایش (%)	روشنایی (%)	بازده تجهیزات	کیفیت عایق
مسکونی	۱۸۰	۴۵	۲۸	۱۲	پایین	ضعیف
تجاری	۲۲۰	۲۷	۳۵	۲۵	متوسط	متوسط
اداری	۲۰۰	۳۵	۳۰	۲۰	متوسط	ضعیف

برای تعیین اینکه کدام یک از اقدامات فنی بیشترین سهم را در کاهش مصرف داشته، سهم هر راهکار از کل صرفه‌جویی به‌دست‌آمده محاسبه شد. حاصل این محاسبه به شرح زیر بود: ۱) بهبود عایق‌کاری پوستهٔ ۴۲ درصد؛ ۲) ارتقای سیستم‌های گرمایش و سرمایش (HVAC) ۳۱ درصد؛ ۳) جایگزینی روشنایی با LED ۱۵ درصد؛ ۴) استقرار سامانهٔ مدیریت انرژی (BEMS) ۱۲ درصد.

۴.۴. تغییرات انتشار آلاینده‌ها در سناریوی بهینه‌سازی

به طور مشخص، اجرای سناریوی بهینه‌سازی علاوه بر کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌های ناشی از مصرف برق و گاز طبیعی را به دنبال دارد. در نتیجه، انتشار تمامی آلاینده‌های مورد بررسی نسبت به وضعیت پایه کاهش یافت. این استنتاج بیانگر ارتباط مستقیم بین بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها و کاهش بار آلایندگی در مقیاس شهری است. از نظر مقدار جرمی دی‌اکسیدکربن (CO_2) بیشترین کاهش را در میان آلاینده‌های بررسی‌شده داشت، البته انتشار آلاینده‌های SO_2، NO_x و $PM_{2.5}$ نیز به طور قابل توجهی کاهش یافت (جدول ۸).

جدول ۷. کاهش سالانهٔ انتشار آلاینده‌ها در سناریوی بهینه‌سازی (وضعیت پایه، بهینه‌سازی و کاهش)

آلاینده	انتشار در وضعیت پایه (تن/سال)	انتشار در سناریوی بهینه (تن/سال)	کاهش مطلق (تن/سال)	کاهش نسبی (درصد)
CO_2	۴۲۰۰۰۰	۲۹۵۰۰۰	۱۲۵۰۰۰	۲۹.۸
SO_2	۱۴۵۰	۱۰۶۰	۳۹۰	۲۶.۹
NO_x	۱۲۰۰	۸۱۰	۳۹۰	۳۲.۵
$PM_{2.5}$	۳۲۰	۲۲۴	۹۶	۳۰

کاهش جرمی CO_2 بیشترین مقدار عددی (۱۲۵ هزار تن) را به خود اختصاص داده، اما آنچه اهمیت دارد عبارت است از اینکه به لحاظ منظر اثرات سلامت‌محور، کاهش ۳۰درصدی $PM_{2.5}$، ۳۲/۵درصدی NOx و ۲۶/۹درصدی SO2 بسیار تعیین‌کننده است. اگرچه ارزیابی دقیق غلظت اتمسفری آلاینده‌ها به مدل‌سازی پراکنش جوی نیاز دارد، اما این کاهش ۳۰درصدی در بار انتشار جرمی PM2.5 و NOX در مبدأ، گامی مهم در جهت تحقق هدف‌گذاری‌های کیفیت هوای سازمان بهداشت جهانی (WHO) در مقیاس شهری محسوب می‌شود. بر اساس ضرایب هزینه‌های خارجی دانشگاه دلفت هلند و گزارش EEA 2024 ارزش اقتصادی سالانهٔ کاهش این آلاینده‌های محلی به‌جز CO_2 حدود ۳/۰۷۳ میلیارد ریال برآورد می‌شود (EEA, 2024; CEDelft, 2024). عمده این رقم ناشی از کاهش ارزش اقتصادی هزینه‌های درمانی و افزایش بهره‌وری نیروی کار است. این یافته تحقیق به سؤال مرتبط با بررسی دربارهٔ «هزینه‌های سلامت ناشی از خلأ اجرایی مبحث ۱۹» پاسخ مستقیمی می‌دهد.

۵.۴. اعتبارسنجی نتایج در مقیاس شهری

خروجی ساختمان نمونه در چارچوب رویکرد Prototype-based UBEM به منظور ارزیابی قابلیت گستردگی نتایج، به ساختمان‌های شهری (مسکونی، اداری و تجاری) شهر قزوین تعمیم داده شد. اعتبار مدل در سطح ساختمان نمونه بر اساس داده‌های واقعی مصرف انرژی و شاخص‌های CV،NMBE(RMSE) و MAPE و مطابق معیارهای ASHRAE Guideline 14 تأیید شد. اگرچه ترازنامهٔ انرژی استان قزوین (سال ۱۴۰۱) به صورت تجمیعی در دسترس است، اما این ترازنامه‌ها تفکیک بر اساس کاربری‌های مسکونی، تجاری و اداری ندارد و نیز مصرف انرژی را در سطح استان (نه فقط شهر قزوین) گزارش می‌کند. از سوی دیگر، روش محاسبهٔ مصرف در ترازنامهٔ مبتنی بر

عوامل بالادستی (کل فروش حامل‌های انرژی) است و با رویکرد پایین به بالای (bottom-up) مدل‌سازی نمونه‌محور این پژوهش قابل قیاس نیست، لذا به‌کارگیری آن برای اعتبارسنجی تفکیک‌شدهٔ شهری امکان‌پذیر نیست؛ و به این‌منظور از روش شاخص شباهت تیپولوژیک (Typological Similarity Index) بر اساس مطالعهٔ Shen & Wang (۲۰۲۴) برای بررسی سازگاری ساختمان‌های نمونه با تیپ‌های هدف استفاده شد.

جدول ۸. خلاصهٔ اعتبارسنجی مدل در سطوح مختلف

سطح اعتبارسنجی	مبنای ارزیابی	وضعیت
ساختمان نمونه	داده‌های واقعی مصرف انرژی	✓ انجام شد
کالیبراسیون مدل	NMBE، CV (RMSE)، MAPE	✓ مطابق ASHRAE Guideline 14
تعمیم به مقیاس شهری	روش Prototype-based UBEM	✓ انجام شد
اعتبارسنجی مستقیم کل محدودهٔ شهری	داده‌های واقعی تجمیعی	در دسترس نبود

۶.۴. تحلیل حساسیت و عدم قطعیت

در این بخش سه پارامتر کلیدی بررسی شد که عبارت بودند از: ضریب انتقال حرارت پوسته (U-value)، قیمت حامل‌های انرژی و ضریب انتشار CO_2 برق. به علاوه، برای ارزیابی استواری نتایج با فرض دامنهٔ تغییرات هر پارامتر برابر ٪۲۰± نسبت به مقدار پایه و همچنین، اثر آن بر مصرف انرژی شهری، کاهش انتشار CO_2 و ارزش فعلی خالص (NPV) بررسی شد. نتایج با فرض ثابت نگه داشته شدن سایر پارامترها نشان داد مصرف انرژی شهری بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات U-value دارد و بهبود ۲۰ درصد در عملکرد حرارتی پوسته، موجب کاهش حدود ۱۰ درصد مصرف انرژی خواهد شد. همچنین، مشخص شد که NPV بیشترین وابستگی را به قیمت حامل‌های انرژی دارد و کاهش ۲۰ درصد قیمت انرژی، موجب کاهش حدود ۲۸ درصد در مقدار NPV خواهد شد. با وجود این تغییرات، مثبت باقی ماندن NPV در تمامی حالت‌ها نشان‌دهندهٔ پایداری اقتصادی سناریوی بهینه‌سازی یکپارچه بوده و در نتیجه بر اساس نتایج، تغییرات انتشار CO_2 متناسب با تغییر ضریب انتشار برق و به صورت تقریباً خطی مشاهده خواهد شد.

علاوه بر سه پارامتر کلیدی یادشده دو پارامتر تأثیرگذار در تحلیل حساسیت یک‌طرفه عنوان شد که نتایج حاصل از آن نیز می‌تواند دلیلی بر پایداری اقتصادی سناریوی بهینه‌سازی یکپارچه شود. این دو پارامتر منطبق بر جدول ۱۱ محاسبه شد.

جدول ۹. نتایج تحلیل حساسیت یک‌طرفه برای پارامترهای کلیدی

پارامتر	تغییرات	مصرف انرژی شهری (GWh/year)	کاهش CO_2 (ton/year)	NPV (میلیارد ریال)
پایه	٪۰	۷۲۰	۱۲۵,۰۰۰	۲۱,۰۱۲
U-value	٪۲۰	۶۴۸	۱۳۷,۵۰۰	۲۳,۵۰۰
U-value	+٪۲۰	۷۹۲	۱۱۲,۵۰۰	۱۸,۵۰۰
قیمت انرژی	٪۲۰	۷۲۰	۱۲۵,۰۰۰	۱۵,۲۰۰
قیمت انرژی	+٪۲۰	۷۲۰	۱۲۵,۰۰۰	۲۶,۸۰۰
ضریب CO_2	٪۲۰	۷۲۰	۱۰۰,۰۰۰	۲۱,۰۱۲
ضریب CO_2	+٪۲۰	۷۲۰	۱۵۰,۰۰۰	۲۱,۰۱۲

جدول ۱۰. نتایج تحلیل حساسیت یک‌طرفه نسبت به نرخ تنزیل و عمر مفید پروژه (تأثیر بر NPV)

متغیر تحلیل	مقدار پایه	دامنهٔ تغییرات	متناظر (میلیارد ریال) NPV	تغییرات نسبت به پایه
نرخ تنزیل (پایه)	۱۰%	---	۲۱.۰۱۲	---
نرخ تنزیل (بدبینانه)	۱۰% الی ۱۵%	۱۵%	۱۷.۵۰۰	-۱۶.۷%
نرخ تنزیل (بسیار بدبینانه)	۱۰% الی ۲۰%	۲۰%	۱۲.۱۰۰	-۴۲.۴%
عمر مفید (پایه)	۱۰ سال	---	۲۱.۰۱۲	---
عمر مفید (خوش‌بینانه)	۱۰ الی ۱۵ سال	۱۵ سال	۲۷.۳۰۰	+۲۹.۹%
عمر مفید (بدبینانه)	۸ الی ۱۰ سال	۸ سال	۱۸.۲۰۰	-۱۳.۴%

*سایر پارامترها در حالت پایه ثابت در نظر گرفته شده‌اند. حتی در بدبینانه‌ترین حالت (نرخ تنزیل ۲۰ درصد و عمر ۸ سال) NPV مثبت باقی می‌ماند.

بررسی نقش مشوق مالی در شرایط اقتصادی سناریو

نتایج حاصل تحلیل حساسیت مؤید آن است که در بدترین سناریوی اقتصادی (کاهش ۲۰درصدی قیمت حامل‌های انرژی)، دورهٔ بازگشت سرمایه از ۰/۷۵ به ۰/۹۴ سال افزایش می‌یابد و NPV با کاهش ۲۸درصدی مواجه می‌شود، اما همچنان مثبت باقی می‌ماند (۱۵/۲۰۰ میلیارد ریال). اگرچه محاسبات NPV با نرخ تنزیل ۱۰ درصد در تمامی سناریوها مثبت باقی می‌ماند، اما در شرایط اقتصادی ایران با نرخ تورم مزمن بالای ۳۰ درصد نرخ سود تسهیلات بانکی حدود ۲۰- ۲۵ درصد و ریسک‌های سیستماتیک نظیر نوسان شدید قیمت حامل‌های انرژی و تغییرات ناگهانی نرخ ارز، سرمایه‌گذاران بخش ساختمان معمولاً نرخ بازده حداقلی (Hurdle Rate) معادل ۲۵ تا ۳۰ درصد را انتظار دارند. همان‌گونه که نتایج تحلیل حساسیت نشان داد (جدول ۱۰)، افزایش نرخ کاهش به ۲۰ درصد ارزش فعلی خالص را حدود ۴۲ درصد کاهش می‌دهد (از ۲۱/۰۱۲ به ۱۲/۱۰۰ میلیارد ریال). بنابراین، بدون اعمال مشوق‌های مالی ۱۵ تا ۲۰ درصدی، پروژهٔ بهینه‌سازی برای سرمایه‌گذاران محافظه‌کار که به دنبال بازدهی متناسب با ریسک سیستماتیک ایران هستند، توجیه کافی نخواهد داشت و مشوق‌های یادشده نقش جبران‌کنندهٔ خلأ بین نرخ تنزیل اجتماعی (۱۰ درصد) و نرخ بازده مورد انتظار بازار (۲۵- ۳۰ درصد) را ایفا می‌کنند. از این‌رو با استناد به این یافته و مطابق با رویکرد Copiello et al. (۲۰۱۷) و Mostafazadeh et al. (۲۰۲۳)، ارائهٔ حداقل مشوق‌های مالی معادل ۱۵ تا ۲۰ درصد از کل هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه (حدود ۴۱۰ تا ۵۵۰ میلیارد ریال) می‌تواند کاهش ریسک و بهبود جذابیت نسبی سرمایه‌گذاری را در شرایط رکود قیمتی اصلاح کند و انگیزهٔ لازم برای اجرای کامل الزامات مبحث ۱۹ را فراهم آورد.

یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد تغییرات قیمت انرژی بیشترین اثر را بر شاخص اقتصادی NPV می‌گذارد. در بدترین حالت (کاهش ۲۰ درصد قیمت انرژی)، سناریوی بهینه‌سازی همچنان دارای NPV مثبت است و بهبود عملکرد حرارتی پوسته (U-value) علاوه بر کاهش مصرف انرژی، نقش مؤثری در افزایش منافع محیطی دارد. نتایج تحلیل حساسیت یک‌طرفه تبیین‌کنندهٔ آن است که یافته‌های اصلی صرفه‌جویی بین ۶۴۸ تا ۷۹۲ گیگاوات ساعت و مثبت بودن NPV، در برابر تغییرات منطقی پارامترهای ورودی از استواری قابل قبولی برخوردار هستند.

۵. بحث

با توجه به اهداف تعریف‌شدهٔ این تحقیق، یافته‌های پژوهش نشان داد فاصلهٔ عملکردی قابل توجهی میان وضعیت موجود ساختمان‌های مورد مطالعه و سناریوی تعریف‌شده متأثر از مبحث ۱۹ وجود دارد. شکل‌گیری کاهش به میزان تقریبی ۴۶/۵ درصدی مصرف انرژی در سناریوی ترکیبی نشان می‌دهد بخش مهمی از این فاصله حاصل عملکرد پوسته و سامانه‌های انرژی ساختمان است. این موضوع نشان می‌دهد در صورت مداخلهٔ همزمان در مؤلفه‌های غیرفعال، فعال و مدیریت مصرف، نسبت به اقدامات منفرد ظرفیت بیشتری برای کاهش تقاضای انرژی دارد (Ang et al. 2020). میزان کاهش محاسبه‌شده در این تحقیق با جهت‌گیری کلی نتایج مطالعات بین‌المللی UBEM هم‌راستا است. این مطالعات نیز بیانگر آن هستند که در صورت مداخلهٔ یکپارچه در پوسته و سامانه‌های انرژی، در مقایسه با اقدامات منفرد، ظرفیت بیشتری برای کاهش تقاضای انرژی در مقیاس ساختمان‌های شهری دارند (Suppa & Ballarini, 2023; Luo et al., 2025). علی‌رغم این نتیجه نباید فراموش کرد که هر گونه تفاوت در اقلیم، ویژگی‌های ساختمان‌ها و ترکیب سناریوهای بهسازی، مقادیر کاهش را تغییر خواهد داد.

نتایج نشان می‌دهد برآورد صرفه‌جویی شهری در دامنهٔ ۶۴۸ تا ۷۹۲ گیگاوات‌ساعت در سال، حاصل تعمیم تیپولوژیک نتایج ساختمان‌های نمونه به موجودی هدف است. این دستاورد باید به عنوان برآورد سناریومحور، نه الزاماً به عنوان اعتبارسنجی مستقیم کل شهر، تفسیر شود (Shen & Wang, 2024). میزان کاهش انرژی مصرف در این مطالعه با برخی مطالعات UBEM و بازسازی عمیق ساختمان هم‌راستا است. این هم‌راستایی نشان می‌دهد بسته‌های ترکیبی می‌توانند در ساختمان‌های دارای ضعف پوسته و سامانه‌های نسبتاً کم‌بازده، کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی ایجاد کنند. بر همین‌اساس، میزان کاهش انرژی به‌دست‌آمده نیز در دامنهٔ طیفی قرار می‌گیرد که در مطالعات بهسازی ساختمان گزارش شده است؛ دامنه‌ای که بسته به عمق مداخله، ویژگی‌های ساختمان و ترکیب اقدامات می‌تواند تفاوت قابل توجهی داشته باشد (Fregonara et al., 2017).

در این پژوهش NPV با نرخ تنزیل ۱۰ درصد محاسبه شده، اما سرمایه‌گذاران در شرایط تورمی ایران، نرخ بازده حداقلی حدود ۲۵ ـ ۳۰ درصد را انتظار دارند. با افزایش نرخ تنزیل به ۲۰ درصد، NPV به حدود ۱۲ هزار میلیارد ریال کاهش می‌یابد (جدول ۱۰). بنابراین مشوق‌های مالی ۱۵ تا ۲۰ درصد نه برای جبران هزینه، بلکه برای جبران ریسک سیستمی، ریسک کاهش قیمت حامل‌های انرژی در آینده و ترغیب سرمایه‌گذاران محافظه‌کار پیشنهاد شده است. درخور یادآوری است که ارزیابی اقتصادی پروژه‌های بهسازی انرژی از مفروضاتی مانند نرخ تنزیل، قیمت انرژی و افق ارزیابی تأثیرپذیر است. بنابراین، هر تغییری در این پارامترها می‌تواند نتیجهٔ ارزیابی مالی را به شکلی معناداری تغییر دهد (Fregonara et al., 2017).

از چشم‌انداز محیطی، کاهش مصرف انرژی به کاهش هم‌زمان انتشار CO_2، SO_2، NOx و $PM_{2.5}$ منجر می‌شود. ارتباط مستقیم بین بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها با کاهش بار آلایندگی شهری را می‌توان از این قضیه استنباط کرد. این خروجی‌ها نشان می‌دهد به خلاف مطالعات پیشین که تمرکز عمده بر CO_2 بوده، در نظر گرفتن هم‌زمان آلاینده‌های محلی امکان تحلیل جامع‌تر پیامدهای محیط زیستی ناشی از کاهش انتشار در مبدأ را فراهم کرده است و با روندهای جدید توسعه UBEM که مبتنی بر شاخص‌های چندگانه است سازگار خواهد بود (Kong et al., 2023; Salvalai et al., 2024).

ارزیابی اقتصادی پروژه‌های بهینه‌سازی انرژی به نرخ تنزیل، طول عمر پروژه و عدم قطعیت داده‌های ورودی وابسته است (Tavakolan et al., 2022). مبنای محاسبات مبتنی است بر نرخ تنزیل اجتماعی در کشورهای درحال‌توسعه (۷/۳ تا ۱۵ درصد) (Turan & Gurluk, 2024)، شرایط اقتصادی کشور (نرخ تورم بالا)، فرضیات محافظه‌کارانهٔ محاسبهٔ NPV و نرخ تنزیل ۱۰ درصد و عمر مفید ۱۰ سال.

تحلیل حساسیت یک‌طرفه پنج پارامتر کلیدی شامل U-value، قیمت انرژی، ضریب انتشار CO_2 برق با دامنهٔ تغییرات ±۲۰٪ نرخ تنزیل (با دامنهٔ ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) و عمر مفید پروژه (با دامنهٔ ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال) را در بر می‌گیرد. نتایج مشخص می‌کند که حتی در بدبینانه‌ترین حالت (نرخ تنزیل ۲۰ درصد و عمر مفید پروژه در سناریوهای ۸، ۱۰ و ۱۵ سال)، سناریوی ترکیبی همچنان از

NPV مثبت برخوردار است. همچنین، نتایج دیگر تحقیق نشان داد مصرف انرژی شهری بیشترین حساسیت را نسبت به U-value دارد؛ به طوری که بهبود ۲۰ درصد در عملکرد حرارتی پوسته، مصرف انرژی را حدود ۱۰ درصد کاهش می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد اهمیت عملکرد حرارتی پوسته با نتایج مطالعات مستقل دریک راستا قرار داد. چنان که Yun و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند تغییرات واقعی U-value ساختمان‌های موجود می‌تواند بر برآورد پتانسیل صرفه‌جویی ناشی از retrofit اثر قابل توجهی داشته باشد (Wang et al., 2022; Yun et al., 2024). با وجود این تغییرات، NPV باز هم در تمامی حالت‌ها مثبت باقی ماند (۱۵/۲۰۰ تا ۲۶/۸۰۰ میلیارد ریال). با اتکا به تحلیل حساسیت می‌توان اظهار داشت در سناریوی کاهش ۲۰درصدی قیمت انرژی، دورهٔ بازگشت سرمایه به ۰/۹۴ سال افزایش می‌یابد و برای حفظ جذابیت اقتصادی، نیاز به مشوق‌های مالی معادل ۱۵ تا ۲۰ درصد هزینهٔ سرمایه‌گذاری (۴۱۰ تا ۵۵۰ میلیارد ریال) احساس می‌شود. اهمیت سازوکارهای اقتصادی مکمل در تصمیم‌گیری برای بازسازی انرژی ساختمان‌ها نیز در مطالعات پیشین مورد تأکید قرار گرفته است (Mostafazadeh et al., 2023). همان‌گونه که انتظار می‌رفت نتایج تحلیل حساسیت نشان داد توجیه‌پذیری اقتصادی سناریوی بهینه‌سازی نسبت به قیمت انرژی و نرخ تنزیل حساس است. اگرچه NPV در سناریوهای بررسی‌شده مثبت باقی می‌ماند، یا افزایش نرخ بازده مورد انتظار سرمایه‌گذار، کاهش قیمت انرژی می‌تواند به کاهش جذابیت نسبی سرمایه‌گذاری منجر شود. مبتنی بر همین نتیجه به نظر می‌رسد که می‌توان مشوق مالی ۱۵ تا ۲۰ درصدی را تحت سناریوی حمایتی برای کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و بهبود جذابیت اقتصادی تفسیر کرد. البته، این موضوع به معنای پذیرش آن به عنوان آستانهٔ قطعی و بی‌نظیر اجرای مبحث ۱۹ تلقی نمی‌شود.

نتایج نشان‌دهندهٔ آن است که مدل UBEM وابستگی بالای به کیفیت داده‌های ورودی دارد. لذا نتایج و رتبه‌بندی سناریوها می‌تواند متأثر از عدم قطعیت پارامترها باشد (Ali et al., 2021). نتایج اصلی صرفه‌جویی انرژی و توجیه‌پذیری اقتصادی سناریوی منتخب با تحلیل حساسیت تأیید کرد که در برابر تغییرات منطقی، پارامترها پایدار، باقی می‌مانند.

در زمان نبود داده‌های اندازه‌گیری‌شده در مقیاس کل وضع موجود ساختمان‌های شهری (مسکونی، تجاری و اداری) اعتبارسنجی مدل در سطح ساختمان نمونه را به مهم‌ترین محدودیت‌های پژوهش تبدیل می‌کند. این پژوهش بستر نهادی و نقش دستگاه‌های متولی همچون شهرداری، نظام مهندسی ساختمان و وزارت نیرو در اجرای مبحث ۱۹را بررسی نکرده است. این مسئله، به‌ویژه در پاسخ به سؤال مرتبط با (محور سیاستی) اهمیت پیدا می‌کند. ارائهٔ مدل اصلاحی برای سازوکارهای نظارتی و تشویقی می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی باشد. بررسی‌ها بیانگر آن است که اثر رفتار بهره‌برداران، ریزاقلیم شهری و تغییرات اقلیمی بلندمدت می‌تواند بر خروجی مدل اثرگذار باشد (Boccalatte et al. 2020) که این موضوع در این پژوهش بررسی نشده است. توسعهٔ مدل‌های پویا، استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده و تلفیق داده‌های سامانه‌های هوشمند ساختمان می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی در نظر گرفته شود. این پژوهش‌ها باید نشان دهند تا چه میزان این داده‌ها می‌توانند دقت مدل‌های UBEM در تحقیق‌های آتی را افزایش دهد (Salvalai et al., 2024; Li & Feng, 2025).

۶. نتیجه‌گیری

این پژوهش مدل‌سازی انرژی شهری نمونه‌محور را در دستور کار خود قرار داد. مدلی که چارچوبی یکپارچه برای ارزیابی هم‌زمان ابعاد فنی، محیطی و اقتصادی ساختمان‌های شهری (با کاربری‌های مسکونی، تجاری و اداری) شهر قزوین را ارائه می‌کند. یافته‌ها نشان داد خلأ بین عملکرد وضع موجود و الزامات مبحث ۱۹، به گونه‌ای است که اجرای سناریوی منطبق با الزامات فنی آن می‌تواند مصرف انرژی را ۴۶/۵ درصد (دامنهٔ ۶۴۸ تا ۷۹۲ گیگاوات‌ساعت در مقیاس شهری) کاهش دهد. این کاستی، انتشار آلاینده‌های CO_2، SO_2، Nox و $PM_{2.5}$ را در سناریوی بهینه‌سازی به‌ترتیب از میزان ۴۲۰ هزار، ۱،۴۵۰، ۱،۲۰۰ و ۳۲۰ تن در سال به مقدار ۲۹۵ هزار، ۱،۰۶۰، ۸۱۰، ۲۲۴ تن در سال (کاهش مطلق آیتم‌ها به‌ترتیب ۱۲۵ هزار، ۳۹۰، ۳۹۰ و ۹۶ تن در سال) کاهش داده و ارزش اقتصادی تقلیل آلاینده‌ها به‌جز CO_2، معادل ۳/۰۷۳ میلیارد ریال برآورد می‌شود. لذا به نوعی اثر مستقیم آن بر کسر بالقوهٔ هزینه‌های خارجی مرتبط با سلامت بر اساس رویکرد Impact Pathway و افت بار انتشار آلاینده‌ها در مبدأ خواهد بود، ولی ارزیابی دقیق غلظت اتمسفری به مدل‌سازی پراکنش جوی نیاز دارد که در این پژوهش به آن پرداخته نشده است. درنهایت، در جمع‌بندی نهایی تحقیق، تحلیل حساسیت نشان داد در شرایط کاهش ۲۰درصدی قیمت انرژی، ارائهٔ حداقل مشوق‌های مالی معادل ۱۵ تا ۲۰ درصد هزینهٔ سرمایه‌گذاری (۴۱۰ تا ۵۵۰ میلیارد ریال)، می‌تواند به عنوان یک سناریوی حمایتی برای کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و حفظ جذابیت اقتصادی اجرای سناریوی منطبق با مبحث ۱۹ در نظر گرفته شود. بر اساس یافته‌ها، با توجه به اینکه کاهش ۲۰ درصد قیمت انرژی NPV را ۲۸ درصد کاهش می‌دهد، به نظرمی‌رسد ایجاد صندوق مشوق‌های مالی با هدف پوشش ۱۵ تا ۲۰ درصد هزینه‌های بهسازی ساختمان‌های شهری (مسکونی، تجاری و اداری)، متناسب با میزان صرفه‌جویی واقعی انرژی می‌تواند مؤثر باشد. همچنین، با توجه به اینکه بهبود U-Value بیشترین تأثیر (۱۰ درصد کاهش مصرف) را دارد، اقدامات مرتبط با بهبود عملکرد حرارتی پوسته می‌تواند در اولویت بررسی برای بهسازی قرار گیرد. لذا در صورتی که پایگاه دادهٔ یکپارچه از مشخصات فنی و عملکردی ساختمان‌ها برای کالیبراسیون و پایش مستمر مدل‌های UBEM شکل بگیرد، نتایج چشمگیری به دنبال خواهد داشت. در این پژوهش تحلیل بستر نهادی و نظام اصلاح سازوکارهای نظارتی مبحث ۱۹ بررسی نشده است که می‌تواند در دستور کار پژوهش‌های آینده قرار گیرد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان در انجام تمام بخش‌های این مقاله سهم برابر داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان در فرایند آماده‌سازی مقاله از دیپ سیک ورژن ۴/۵ فقط برای کمک به اصلاح خطاهای املایی و نگارشی، بهبود روانی و وضوح بیان و بررسی سازگاری زبانی متن فارسی و انگلیسی و تولید نمودار روش تحقیق استفاده کرده‌اند. تمامی پیشنهادهای ارائه‌شده توسط این ابزارها به وسیلهٔ نویسندگان بررسی شده و مسئولیت کامل محتوای علمی، داده‌ها، تحلیل‌ها، نتایج و نسخهٔ نهایی مقاله به عهدهٔ نویسندگان است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی یا غیرمالی مرتبط با انجام پژوهش، تحلیل نتایج و انتشار این مقاله ندارند.

منابع

Abolhassani, S. S., Amayri, M., Bouguila, N., & Eicker, U. (2022). A new workflow for detailed urban-scale building energy modeling using spatial joining of attributes for archetype selection. *Journal of Building Engineering*, 46, 103661. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103661

Ali, U., Shamsi, M. H., Bohacek, M., Purcell, K., Hoare, C., Mangina, E., & O'Donnell, J. (2020). A data-driven approach for multi-scale GIS-based building energy modeling for analysis, planning, and support decision making. *Applied Energy*, 279, 115834. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115834

Ali, U., Shamsi, M. H., Hoare, C., Mangina, E., & O'Donnell, J. (2021). Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods, and tools using qualitative and quantitative analysis. *Energy and Buildings*, 246, 111073. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111073

Ang, Y. Q., Berzolla, Z. M., & Reinhart, C. F. (2020). From concept to application: A review of use cases in urban building energy modeling. *Applied Energy*, 279, 115738. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115738

Arab G. (2020). Energy performance target-setting for an office building using baseline and energy performance index concepts. *Renewable and New Energies*, 7(2): 73–80. [In Persian]

Asadi, E., da Silva, M. G., Antunes, C. H., & Dias, L. (2012). A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, NSGA-II, and TOPSIS. *Energy and Buildings*, 44, 81–87. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.017

ASHRAE. (2020). *ASHRAE Guideline 14-2020: Measurement of energy, demand, and water savings*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.

Blank, L. T., & Tarquin, A. J. (2018). *Engineering economy* (8th Ed.). McGraw-Hill Education.

Boccalatte, A., Fossa, M., Gaillard, L., & Menezo, C. (2020). Microclimate and urban morphology effects on building energy demand in different European cities. *Energy and Buildings*, 224, 110129. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110129

CE Delft. (2024). *Environmental prices handbook 2024: EU27 version* (Version 1.1). CE Delft. https://cedelft.eu/publications/environmental-prices-handbook-2024-eu27-version/

Chen, Y., Hong, T., & Piette, M. A. (2017). Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis. *Applied Energy*, 205, 323–335. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.128

Copiello, S., Gabrielli, L., & Bonifaci, P. (2017). Evaluation of energy retrofit in buildings under conditions of uncertainty: The prominence of the discount rate. *Energy*, 137, 104–117. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.159

Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6

EEA (European Environment Agency). (2024). *Air quality in Europe 2024*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2800/5970

European Commission. (2019). *Handbook on the external costs of transport: Version 2019*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2832/51388

Excell, L. E., Nutkiewicz, A., & Jain, R. K. (2024). Multi-scale retrofit pathways for improving building performance and energy equity across cities: A UBEM framework. *Energy and Buildings*, 324, 114931. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114931

Fayaz, R., & Kari, B. M. (2009). Comparison of energy conservation building codes of Iran, Turkey, Germany, China, ISO 9164, and EN 832. *Applied Energy*, 86(10), 1949–1955. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.024

Fennell, P. J., Ebrahimigharehbaghi, S., Mata, É., Kokogiannakis, G., Amrith, S., Ignatiadou, S., & Lo Piano, S. (2025). Urban building energy models: How can we improve the treatment of uncertainty for energy policy decision-making? *Environmental Research Communications*, 7(2), 022002. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad9438

Fregonara, E., & Ferrando, D. G. (2023). The discount rate in the evaluation of project economic-environmental sustainability. *Sustainability*, 15(3), 2467. https://doi.org/10.3390/su15032467

Fregonara, E., Lo Verso, V. R. M., Lisa, M., & Callegari, G. (2017). Retrofit scenarios and economic sustainability: A case study in the Italian context. *Energy Procedia*, 111, 245–255. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.026

IEA (International Energy Agency). (2024). *Breakthrough agenda report 2024: Buildings*. International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2024/buildings

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2022). *Climate change 2022 - mitigation of climate change: Working group III contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926

Johari, F., Lindberg, O., Ramadhani, U. H., Shadram, F., Munkhammar, J., & Widén, J. (2024). Analysis of large-scale energy retrofit of residential buildings and their impact on the electricity grid using a validated UBEM. *Applied Energy*, 361, 122937. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122937

Johari, F., Peronato, G., Sadeghian, P., Zhao, X., & Widén, J. (2020). Urban building energy modeling: State of the art and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109902. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109902

Kazemi M. (2017). Strategies for improving building energy efficiency. *Soffeh*, 27(79): 37–45. [In Persian]

Kazemipouran Badr S., Daneshjoo F., Masoumi Haghighi A., & Shayanfar M. A. (2020). The effect of building management systems and insulation on reducing energy consumption using energy analysis of residential buildings. *Structural and Construction Engineering*, 7(2): 5–23. [In Persian] https://doi.org/10.22034/ias.2022.351685.2022

Kong, D., Cheshmehzangi, A., Zhang, Z., Pourroostaei Ardakani, S., & Gu, T. (2023). Urban building energy modeling (UBEM): A systematic review of challenges and opportunities. *Energy Efficiency*, 16, 69. https://doi.org/10.1007/s12053-023-10147-z

Kordjamshidi M. (2020). Developing residential building typologies with a thermal-efficiency approach for residential buildings in Babolsar City. *Iranian Architecture and Urbanism*: 95–114. [In Persian] https://doi.org/10.30475/isau.2020.131915.0

Li, Y., & Feng, H. (2025). Integrating urban building energy modeling (UBEM) and urban-building environmental impact assessment (UB-EIA) for sustainable urban development: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 213, 115471. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115471

Luo, L., Wei, H., Lin, Z., Wu, J., Wang, W., & Sun, Y. (2025). Multi-objective optimal energy-efficient retrofit determination using hybrid urban building energy model: Considering uncertainties be-

tween models. *Building Simulation*, 18(1), 183–206. https://doi.org/10.1007/s12273-024-1206-6

Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., & Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, 55, 889–902. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018

Ministry of Roads and Urban Development. (2020). *National Building Regulations of Iran, Section 19: Energy conservation*. National Building Regulations and Control Office. [In Persian]

Mostafazadeh, F., Jalilzadeh Eirdmousa, S., & Tavakolan, M. (2023). Energy, economic, and comfort optimization of building retrofits considering climate change: A simulation-based NSGA-III approach. *Energy and Buildings*, 280, 112721. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112721

National Building Regulations Office. (2025). *National Building Regulations, Section 19: Energy management in buildings* (5th Ed.). Ministry of Roads and Urban Development. [In Persian]

Nazari, S., Shahhoseini, O., Sohrabi, A., & Asayesh, H. (2010). Experimental determination and analysis of CO_2, SO_2, and NOx emission factors in Iran's thermal power plants. *Energy*, 35(7), 2992–2998. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.025

Oraiopoulos, A., & Howard, B. (2022). On the accuracy of urban building energy modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 111976. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111976

Peyvandi, M., Hajinezhad, A., & Moosavian, S. F. (2023). Investigating the intensity of GHG emissions from electricity production in Iran using renewable sources. *Results in Engineering*, 17, 100819. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100819

Reinhart, C. F., & Cerezo Davila, C. (2016). Urban building energy modeling—A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196–202. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001

Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617–3631. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014

Salvalai, G., Zhu, Y., & Sesana, M. M. (2024). From building energy modeling to urban building energy modeling: A review of recent research trends and simulation tools. *Energy and Buildings*, 319, 114500. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114500

Shen, P., & Wang, H. (2024). Archetype building energy modeling approaches and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114478. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114478

Shu, L., & Zhao, D. (2023). Decision-making approach to urban energy retrofit—A comprehensive review. *Buildings*, 13(6), 1425. https://doi.org/10.3390/buildings13061425

Soltaninejad Z., Ghasemi M., & Soltaninejad M. (2021). Energy behavior analysis of a school building in Kerman City according to building classification under Section 19 of the Iranian National Building Regulations using TRNSYS. In *Proceedings of the 7th Annual International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jrenew.2023.184649

Suppa, A. R., & Ballarini, I. (2023). Supporting climate-neutral cities with urban energy modeling: A review of building retrofit scenarios, focused on decision-making, energy and environmental performance, and cost. *Sustainable Cities and Society*, 98, 104832. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104832

Suppa, A. R., Bottero, M. C., Corrado, V., & Dell'Anna, F. (2026). District-scale life cycle costing of climate-neutral retrofits, based on automatic envelope detection workflows and LOD3 3D city model. *Energy and Buildings*, 359, 117289. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117289

Tardioli, G., Kerrigan, R., Oates, M., O'Donnell, J., & Finn, D. P. (2018). Identification of representative buildings and building groups in urban datasets using a novel pre-processing, classification, clustering, and predictive modelling approach. *Building and Environment*, 140, 34–50. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.015

Tavakolan, M., Mostafazadeh, F., Jalilzadeh Eirdmousa, S., Safari, A., & Mirzaei, K. (2022). A parallel computing simulation-based multi-objective optimization framework for economic analysis of building energy retrofit: A case study in Iran. *Journal of Building Engineering*, 45, 103485. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103485

Tian, W. (2024). Towards advanced uncertainty and sensitivity analysis of building energy performance using machine learning techniques. *Journal of Building Performance Simulation*, 17(6), 655–662. https://doi.org/10.1080/19401493.2024.2381751

Turan, Ö., & Gurluk, S. (2024). The impacts of social discount rate in countries striving for industrialization. *Journal of the Knowledge Economy*, 15(2), 5428–5442. https://doi.org/10.1007/s13132-023-01388-5

UNEP (United Nations Environment Programme) & GlobalABC (Global Alliance for Buildings and Construction). (2024). *Global status report for buildings and construction 2023: Towards zero-emission, efficient and resilient buildings and construction*. United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/45095

Wang, C., Ferrando, M., Causone, F., Jin, X., Zhou, X., & Shi, X. (2022). Data acquisition for urban building energy modeling: A review. *Building and Environment*, 217, 109056. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109056

Wang, C., Wang, X., Causone, F., Yang, Y., Gao, N., Ye, Y., Li, P., & Shi, X. (2025). Addressing uncertainty to achieve stability in urban building energy modeling: A comparative study of four possible approaches. *Building and Environment*, 267, 112197. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112197

WHO (World Health Organization). (2023). *Health risks of air pollution in Europe: Updated estimates of the burden of disease*. WHO Regional Office for Europe.

Xu, X., González, J. E., Shen, S., Miao, S., & Dou, J. (2018). Impacts of urbanization and air pollution on building energy demands—Beijing case study. *Applied Energy*, 225, 98–109. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.120

Yun, W.-S., Ryu, W., Lee, D., & Seo, H. (2024). Energy-saving potential estimation of retrofitting aged buildings considering external wall insulation degradation. *Journal of Building Engineering*, 94, 110022. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110022

Zhang, D., Chen, Y., Yang, J., & Chen, Z. (2022). Archetype identification and urban building energy modeling for city-scale buildings based on GIS datasets. *Building Simulation*, 15(9), 1547–1559. https://doi.org/10.1007/s12273-021-0878-4

Zhang, Y. (2013). Urban metabolism: A review of research methodologies. *Environmental Pollution*, 178, 463–473. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.052

Zhang, Y., Yang, Z., & Yu, X. (2015). Urban metabolism: A review of current knowledge and directions for future study. *Environmental Science & Technology*, 49(19), 11247–11263. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03060