

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 محیط‌زیست، پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تهران، ارس، ایران.

۲- گروه طراحی محیط‌زیست، دانشکده‌ی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول: darabih@ut.ac.ir).

۳- گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده‌ی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۴- گروه مهندسی مخاطرات، آموزش و سیستم‌های محیط‌زیست، دانشکده‌ی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: 1405-05-26

تاریخ بازنگری: 1405-07-02

تاریخ پذیرش: 1405-07-09

چکیده

از مهمترین عوامل تاثیر گذار در رشد افسارگسیخته و روزافزون شهرنشینی در بخش ساختمان، افزایش مصرف انرژی است. مدیریت این موضوع نیازمند به کارگیری رویکردهای کارآمد ارزیابی و بهینه‌سازی مصرف انرژی می باشد. این مطالعه با هدف ارائه‌ی چارچوبی یکپارچه برای ارزیابی هم‌زمان عملکرد انرژی، پیامدهای محیط‌زیستی 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 است و کالیبراسیون مدل با داده‌های واقعی مصرف انرژی انجام پذیرفت. ($MAPE=3.3\%$, $CV(RMSE)=3.4\%$). نتایج نشان داد که اجرای سناریوی جامع بهینه‌سازی، مصرف انرژی ساختمان نمونه را تا ۴۶.۵ درصد کاهش می دهد. با تعمیم نتایج به ساختمان‌های مسکونی، تجاری و اداری هم تیپ در سطح شهر، سالانه بین ۶۴۸ الی ۷۹۲ گیگاوات ساعت صرفه‌جویی انرژی محقق می شود. این امر منجر به کاهش مطلق انتشار سالانه آلاینده‌های CO_2 به میزان ۱۲۵۰۰۰ تن، SO_2 به میزان ۳۹۰ تن، NO_x به میزان ۳۹۰ تن و $PM_{2.5}$ به میزان ۹۶ تن می گردد. تحلیل حساسیت یک‌طرفه نشان داد که ضریب انتقال حرارت پوسته بیشترین تاثیر 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، محیط‌زیستی و اقتصادی سناریوهای بهسازی ساختمان‌های شهری مورد استفاده قرار گیرد.

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

در پی رشد شهرنشینی و افزایش سطح زیربنای ساختمان‌ها، بخش ساختمان به یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان 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 در هم تنیده 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 این میان ساختمان‌ها بخش کالبدی و به نوعی، بنیادین این سیستم را شکل می‌دهد و از سوی دیگر، یکی از کانونهای اصلی تقاضای انرژی به شمار می‌رود (Salvalai et al., 2024). مشخص است که عملکرد انرژی ساختمانها، متاثر تعامل ویژگی‌های کالبدی و فنی، نوع کاربری، الگوی بهره‌برداری با شرایط اقلیمی و محیطی از یک سو و سامانه تأمین انرژی سوی دیگر می‌باشد. (Boccalatte et al., 2020). همین امر باعث می‌شود تا هرگونه تغییر عملکرد انرژی ساختمان‌های وضع موجود فقط به تغییر تقاضای انرژی منتهی نشوند بلکه ضمن تاثیر پذیری از محیط، باعث انتشار آلاینده‌ها بوده و بر هزینه‌های مرتبط با محیط نیز اثرگذار باشند (Xu et al., 2018). شکل‌گیری این در هم کنش برای یک سیستم پیچیده شهری، موضوع انرژی ساختمان را از واحدی منفرد، به بخشی از عملکرد سیستم شهری مبدل می‌کند. بر همین اساس تحلیل در مقیاس ساختمان وضع موجود، و سپس بررسی در مقیاس شهری و نهایتاً فراهم کردن بنیان‌های لازم و درعین حال مرتبط با اهداف برنامه‌ریزی و مداخله 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 ساخته و شرایط تحلیل رابطه میان ساختمان وضع موجود و میزان تقاضای انرژی آن را ایجاد نماید. براساس میزان تجمیع داده‌ها و شیوه بازنمایی ساختمان‌ها را می‌توان رویکردهای UBEM را دسته‌بندی 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. به طور اخص هنگامی که محدودیت داده‌های تفصیلی وجود دارد و قرار است این کار با هزینه محاسباتی کمتر صورت گیرد، رویکرد پایین به بالا استفاده می‌شود. بدیهی است که میزان دقت نتایج وابسته به کیفیت تیپ‌بندی و میزان نمایندگی ساختمان‌های منتخب است. (Reinhart & Cerezo Davila, 2016; Shen & Wang, 2024) در رویکردهای که تحت عنوان بالا به پایین شناخته می‌شود، برآورد مصرف انرژی ساختمان‌ها متکی به استفاده از داده‌های تجمیعی و روابط آماری در مقیاس کلان 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 همه این اوصاف نباید فراموش کرد که این مدل، بخشی از سیستم شهری در چارچوب تحلیل‌های انرژی ساختمان را مدل‌سازی می‌کند. این بدان معناست که برای رسیدن به تصمیم‌گیری در سطح شهری و دریافت خروجی‌های تصمیم‌گیری نیاز است که تا رابطه‌ی متناسب با سایر مولفه‌های شهری و همچنین پیامدهای آن بر سایر زیرمجموعه شهر، برقرار گردد (Ali et al., 2020).

در صورتی که این سیستم پذیرفته شود، آنگاه مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، نوعی مداخله، مبتنی بر قانون تلقی خواهد شد که تلاش می‌کند 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 را 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). دامنه 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 شکل گرفته در عرصه مبحث ۱۹، بیشتر متمرکز بر الزامات منطبق با این مبحث و یا عملکرد انرژی ساختمان باشد (Arab, 2020; Kazemi, 2017; Kazemipouran et al., 2020). این نوع از نگرش و تأکید مستقیم بر بحث مبحث ۱۹ و یا عملکرد انرژی منجر به تمرکز به یک جزء از سیستم کلان شهری بدون توجه به روابط و در هم کنش آنها با محیط شهری، شده است. در این راستا سه سطح «انرژی-محیط زیست-اقتصاد» در یک نظام شهری کمتر کانون توجه محققانی بوده که بر مبحث ۱۹ و کارایی انرژی تمرکز داشته اند.

براین اساس، زمانی می‌توان ارزیابی دقیق و عمیق در عین حال جامع‌تری از عملکرد انرژی ساختمان داشت که اولاً این موضوع در مقیاس شهری بررسی شود. ثانیاً این بررسی تلاش کند تا تصویری جامع‌تر از پیامدهای یک مداخله مقرراتی ارائه کند. تصویری که صرفاً به واحدهای زیر مجموعه خرد یک سیستم اکتفا نکند. ثالثاً گام را از تغییر مصرف انرژی فراتر گذاشته و بتواند پیامدهای محیط‌زیستی آن را به تصویر بکشد. همچنین در صورتی که اثرات اقتصادی آن نیز مدنظر قرار گیرد، آنگاه می‌تواند زنجیره‌ای از تحلیل مبتنی بر تغییر مصرف انرژی به تغییر در انتشار، سپس هزینه‌های محیط‌زیستی مرتبط را نشان دهد. در کنار آن پرداختن به اثرات اقتصادی مداخله، می‌تواند در توجیه‌پذیری اقتصادی مؤثر باشد. این استدلال مبتنی بر سه عامل: «عملکرد انرژی، پیامدهای محیط‌زیستی و ارزیابی اقتصادی» است که می‌تواند به عنوان یک سطح مکمل از تحلیل‌های منفرد مدنظر قرار گیرد. بررسی ادبیات و پیشینه تحقیق در چارچوب انتقادی نشان خواهد داد که مطالعات قبلی، این سه سطح را چگونه پوشش داده و آنها را به هم متصل کرده‌اند.

۲. پیشینه نظری و تجربی

به منظور بررسی پیشینه پژوهش مطالعات مرتبط در دو بخش ارائه می‌گردد. الف) ادبیات توسعه مدل‌سازی انرژی ساختمان؛ ب) مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان. هر بخش به تفکیک مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱.۲. ادبیات توسعه مدل‌سازی انرژی ساختمان

بررسی ادبیات توسعه مدل‌سازی انرژی ساختمان در مقیاس شهری، نشان‌دهنده گسترش دسترسی به منابع داده‌های مکانی؛ افزایش، خودکارسازی تولید مدل‌های متنوع و همچنین به کارگیری آن‌ها، تحول مدل‌سازی از تک بنا 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 این میان UBEM از جمله 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 همین راستا، چن و همکاران (۲۰۱۷) باهدف صرفه‌جویی انرژی و هزینه با توسعه City BES و تولید خودکار، مدل‌های Energy Plus را بر پایه داده‌های شهری برای ۹۴۰ ساختمان اداری و تجاری در سان‌فرانسیسکو اقدام

به ارائه و ارزیابی سناریوهای مختلف، بهسازی کرده‌اند. ژلنگ و همکاران (۲۰۲۲) 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 موردنظر در صرفه‌جویی انرژی در مقیاس شهری نشان دادند. ابوالحسنی و همکاران (۲۰۲۲) در شهر مونترآل با استفاده از CityGML، انتخاب خودکار archetype و Energy Plus، یک UBEM ارائه کردند. آنها تأکید خاصی بر نقش ویژگی‌های بهره‌برداری ساختمان در تقاضای انرژی منطقه‌ای را داشتند. در تداوم این مطالعات، از UBEM استفاده شده و در تلفیق با مدل شبکه برق، اثر سناریوهای بهسازی گسترده ساختمان وضع موجود نه تنها بر انرژی بلکه بر سایر زیرساخت‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است (Johari et al., 2024). با این حال، توسعه 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 از جمله 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 هزینه محاسباتی را به شدت کاهش می‌بخشد. در این مدل‌سازی‌ها به موضوعاتی مانند اعتبار نتایج به نحوه 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 توسعه UBEM با گذشت زمان در حال گذار از مقیاس ساختمان به شهر است. این مساله ظرفیت ارزیابی سناریوهای بهسازی را بهبود داده است. اما موضوعی که همچنان قابل توجه است وابستگی اعتبار تعمیم نتایج به کیفیت تیپ‌بندی و داده‌های ورودی است. ضمن این که 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 حوزه مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، چارچوب الزامات صرفه‌جویی و بهبود عملکرد انرژی ساختمان را ارائه می‌کند. در این راستا به تدریج 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 نیم‌نگاهی به قابلیت‌ها و محدودیت‌های آن مقایسه کرده‌اند. کردجمشیدی (۲۰۲۰) اقدام به ارزیابی ۳۸۴ واحد مسکونی در بابل در هشت تیپ ساختمانی اقدام کرده و این ارزیابی را به سطح تیپولوژی مسکن محدوده تعمیم داده است. این مطالعه 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 به دست آمده ساختمان‌ها براساس میزان صرفه‌جویی انرژی مبتنی بر مقررات ملی ساختمان و پیامدهای محیط‌زیستی دسته‌بندی شده‌اند. توکلان و همکاران (۲۰۲۲) اقدام به بررسی و تلفیق شبیه‌سازی با شاخص‌هایی مانند دوره بازگشت تنزیل‌شده و اثر سیاست‌های قیمت انرژی انجام داده‌اند.

گرایش اصلی این بخش از مطالعات به سمت و سوی مباحث فنی است اگر چه به تدریج و با گذشت زمان مولفه‌های دیگر مانند مؤلفه‌های اقتصادی و محیطی نیز وارد این مباحث شده است اما بیشتر مطالعات هنوز بر روی تک بنا متمرکز هستند یا حداکثر به بررسی یک تعداد ساختمان اقدام کرده‌اند. اما کمتر به موضوع سیستم شهری و یکپارچه با در نظر گرفتن، ابعاد مختلف سیستم درهم تنیده شهری از دیدگاه عملکرد انرژی ساختمان ورود کرده‌اند. این در حالی است که در مطالعات بین‌المللی این قبیل پژوهش‌ها از ارزیابی تک بعدی به سمت مطالعات تلفیقی حرکت کرده‌اند و در این بین نیز برخی از مطالعات پیامدهای

محیط‌زیستی و اقتصادی را هم ترکیب نموده اند. به عنوان مثال سوپا و بالرینی (۲۰۲۳) نشان می‌دهد سناریوهای بهسازی ضمن اینکه بحث مصرف انرژی و انتشار را پیگیری می‌کنند این موضوع را با هزینه‌های مداخله و بازده اقتصادی پیوند می‌زنند. در مطالعه UBEM لو و همکاران (۲۰۲۵) مباحث چندگانه ای را شامل بهینه‌سازی چندهدفه و تحلیل عدم قطعیت، سناریوهای بهسازی مبتنی بر مصرف انرژی، انتشار کربن و هزینه چرخه عمر را پیگیری کرده اند. پژوهشی جدیدتر، همین اقدام رخ داده است با این تفاوت که موضوع به مقیاس ناحیه، تسری داده شده است (Suppa et al., 2026). البته این بدان معنا نیست که در پژوهش‌های داخلی تحلیل چندبعدی وجود ندارد، اما این تلفیق‌ها کمتر از مجموعه ساختمان‌ها، پا را فراتر گذاشته اند. نمونه آن، مطالعه توکلان و همکاران (۲۰۲۲) می‌باشد که انرژی و شاخص‌های اقتصادی بهسازی را در یک واحد ساختمانی تلفیق کرده اند. در پژوهشی دیگر مصطفی زاده و همکاران (۲۰۲۳) بهسازی ساختمانی مسکونی در تهران علاوه بر انرژی موضوع انتشار CO₂، هزینه چرخه عمر و آسایش حرارتی را هم بررسی کرده اند. لذا بررسی ادبیات نشان می‌دهد که ادبیات بین‌المللی به سمت تلفیق انرژی، محیط‌زیست، اقتصاد در مقیاس‌های بزرگ‌تر 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 شده اند. به صورت مشخص باید اذعان کرد که با وجود مطالعات متعدد درباره UBEM و ارزیابی عملکرد انرژی ساختمان، چارچوبی که الزامات مقررات انرژی ساختمان را به پیامدهای کمی در مقیاس شهری و در سه بعد انرژی، محیط‌زیست و اقتصاد متصل کند، همچنان محدود است.

مروری بر ادبیات موضوع، دلالت بر آن دارد که توسعه مدل‌سازی انرژی ساختمان ضمن افزایش مقیاس، اقدام به تلفیق ابعاد مختلف کرده و بخشی از سیستم شهری را نیز مورد توجه قرار داده و بر پیامدهای حاصل از عملکرد انرژی تمرکز کرده است. مطالعات موخر، ضمن ورود به عرصه شهری، گاه ابعاد تازه‌ای مانند ابعاد اجتماعی را وارد سناریوهای خود کرده و فراتر از ساختمان در مقیاس محلات و ساختار شهری موضوع را بررسی کرده اند (Excell et al., 2024). ضمن این که موضوعاتی مانند چرخه عمر، پیوند مباحث مصرف انرژی با پیامدهای محیط‌زیستی در بخش قابل توجه‌ای از پژوهش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. (Li & Feng, 2025). در مطالعات داخلی نیز نمونه‌های از تلفیق انرژی با اقتصاد، انتشار و اقلیم آسایش قابل مشاهده است. اما وجه تمایز آن با مطالعات بین‌المللی در مقیاس آن و ابعاد موضوع مورد بررسی است (Tavakolan et al., 2022). آنچه در این میان حائز اهمیت است صرف ورود به ابعاد مختلف مانند اقتصاد یا محیط زیست نیست. بلکه مساله بنیادین گسست در نحوه پیوستگی تحلیل در مقیاس از یک سو و نحو ارزیابی ابعاد به صورت درهم کنش متاثر از مقیاس است. اگرچه چارچوب و الزامات قانونی مداخله در کشور فراهم است، اما این الزامات چگونه تبدیل به سناریوهایی شود که در مقیاس شهری مورد توجه قرار گیرد و از طرف دیگر ابعاد متفاوت را یکپارچه کند، خلاء جدی مشاهده می‌شود. لذا می‌توان به این شیوه بیان کرد که خلاء در جهت‌گیری پژوهشی مرتبط با این حوزه در پیوند نظام‌مند مقررات، عملکرد انرژی، محیط‌زیست، اقتصاد در مقیاس ساختمان‌های شهری است. آنچه مشخص است، فقدان به چارچوبی است که الزامات مبحث ۱۹ را به سناریوی قابل‌سنجش در مقیاس ساختمان‌های شهری مدل کند و ضمن این که فاصله عملکرد موجود با وضعیت مدنظر مقررات را مدل کند و در نهایت بتواند و پیامدهای این خلاء را در امتداد زنجیره انرژی، انتشار و اقتصاد مورد ارزیابی قرار دهد.

پژوهش حاضر در پاسخ به این خلاء، تلاش می‌کند تا بتواند مبحث ۱۹ را به‌عنوان چارچوب مرجع مداخله و UBEM نمونه‌محور را به‌عنوان ابزار کمی‌سازی آن در مقیاس ساختمان‌های وضع موجود کند. بر این مبنا تلاش می‌شود تا ساختمان‌های مسکونی، تجاری و اداری شهر قزوین براساس تیپولوژی ساختمانی مدل‌سازی شوند و فاصله میان وضعیت موجود و سناریوی منطبق با الزامات مبحث ۱۹ مدل‌سازی و محاسبات کمی انجام گردد. نتیجه کار از سه زوایه عملکرد انرژی، پیامدهای انتشار و شرایط اقتصادی اجرای سناریوی بهینه‌سازی مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد. بر همین اساس نیز پژوهش حاضر با به کارگیری

رویکرد تیپولوژی ساختمانی و مدل سازی نمونه محور ، به دنبال پاسخگویی به این سه مساله است :۱-خلاء کمی بین شدت مصرف موجود و اجرای الزامات مبحث ۱۹ در ساختمان های مسکونی ، تجاری و اداری چه میزان است ؟ ۲- این خلاء چه بار اضافی از آلاینده های محلی و هزینه های خارجی مرتبط با آن را بر شهر تحمیل می کند ؟ ۳- تغییر شرایط اقتصادی چه اثری بر توجیه پذیری سناریوی منطبق با مبحث ۱۹ دارد و مشوق مالی چه نقشی در بهبود جذابیت اقتصادی آن می تواند ایفا کند ؟

۳. روش پژوهش

۳.۱ چارچوب پژوهش

جامعه آماری این پژوهش شامل ساختمان های مسکونی ، تجاری و اداری شهری متناسب با منابع آماری شهرداری قزوین و سازمان نظام مهندسی ساختمان استان قزوین می باشد. برای مواجهه با محدودیت داده ها ، از رویکرد تیپولوژی استفاده شد. ساختمان ها بر اساس سه معیار الف : کاربری (مسکونی ، تجاری و اداری) ب : دوره ساخت (از ۱۳۸۵ تا کنون) و ج : تعداد طبقات به ۳ گروه اصلی تقسیم شدند. سپس ویژگی های هندسی، پوسته و سامانه های تأسیساتی برای تعیین همگنی درون هر تیپ و انتخاب ساختمان نماینده مورد استفاده قرار گرفت. برای هر گروه چند ساختمان نمونه که دارای بیشترین تشابه هندسی ، سازه ای و تأسیساتی با گروه خود بوده اند انتخاب گردید. مشخصات فنی ساختمان های نمونه های اصلی ، متوسط مقیاس ، ۵ سقف با زیر بنای بالای ۶۰۰ مترمربع برای کاربری مسکونی ، ۲ سقف با زیر بنای بالای ۴۰۰ مترمربع برای کاربری تجاری و ۴ سقف با زیر بنای بالای ۲۰۰ مترمربع برای کاربری اداری به عنوان مبنا در شبیه سازی قرار گرفتند.

برای انتخاب ساختمان های نمونه از میان هر تیپ ، از معیار ترکیبی (میانگین هندسی+بیشترین فراوانی) استفاده شد. بدین صورت که ابتدا پر تکرارترین محدوده ی مساحت ، تعداد طبقات و سال ساخت در هر تیپ مشخص گردید، سپس ساختمانی که مشخصات آن به میانگین هندسی پارامترهای مذکور نزدیک ترین فاصله را داشت ، به عنوان ساختمان نمونه انتخاب شد. این روش ، هم نمایندگی آماری (بیشترین فراوانی) و هم مرکزیت توزیع داده ها (میانگین هندسی) را تامین می کند و با رویکرد استاندارد (Tardioli et al. 2018) هم خوانی دارد.

پژوهش حاضر در چهار مرحله عملیاتی شده است: (۱) گردآوری داده های فنی، اقلیمی و مصرف انرژی ساختمان های شهری قزوین؛ (۲) توسعه و کالیبراسیون مدل انرژی نمونه با Design Builder/Energy Plus براساس ASHRAE Guideline14 (ASHRAE, 2020)؛ (۳) تعریف سناریوهای پایه و بهینه سازی مبحث ۱۹؛ (۴) ارزیابی یکپارچه صرفه جویی انرژی، کاهش آلاینده ها (CO_2 , SO_2 , NO_x , $PM_{2.5}$) و شاخص های اقتصادی دوره بازگشت سرمایه (Payback Period)، ارزش فعلی خالص (NPV) و نرخ بازده داخلی (IRR). این چارچوب مبتنی بر رویکرد نمونه محور (Prototype-based UBE) است

(شکل ۱) .



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

۳.۲ مطالعه موردی و توسعه مدل انرژی شهری (UBEM)

شهر قزوین دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد (BSk) می باشد. با عنایت به محدودیت داده‌های تفصیلی در این پژوهش، از رویکرد نمونه‌محور (Prototype-based UBE) با عنایت به محدودیت داده‌های تفصیلی در این پژوهش استفاده گردید. 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 تاسیساتی (سرمایش، گرمایش، مصرف انرژی در ساختمان‌های (مسکونی، تجاری و اداری) شهر قزوین است. به استناد ادبیات موضوعی و با عنایت به فقدان داده‌های تفصیلی در مقیاس تک‌بنا، رویکرد Prototype-based UBE برای مدل‌سازی انتخاب گردید. سپس ساختمان‌ها بر اساس کاربری، دوره ساخت، تعداد طبقات، ویژگی‌های پوسته و سامانه‌های تاسیساتی در تیپ‌های همگن کلاسه بندی شد. 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 صرفاً به ساختمان‌های واقع در همان دامنه تیپولوژیک تعمیم داده شد. براین اساس برآورد شهری این پژوهش بیانگر عملکرد ساختمان‌های هدف همگن است. عملاً امکان مدل‌سازی مستقیم تک‌تک ساختمان‌های شهر وجود ندارد.

جدول ۲. مشخصات ساختاری و فیزیکی تیپ های ساختمانی در شهر قزوین

کاربری	کد تیپ	سهم از زیر بنا (%)	تعداد کل ساختمان (تخمین)	دامنه میانگین مساحت زیربنا (مترمربع)	دامنه تعداد طبقات	قدمت غالب (سال)	مشخصات پوسته حرارتی	سیستم گرمایش/سرمایش
مسکونی	T-Res	۶۵٪	۱۰۹۲	۶۰۰	۴-۵	۱۳۸۵ تا کنون	دیوار سفال آجری، پنجره سه جداره معمولی - U-VALUE ضعیف	پکیج دیواری/اسپلیت
تجاری	T-COM	۱۵٪	۵۰۴	۴۰۰	۱-۲	۱۳۸۵ تا کنون	جداره های شیشه ای بزرگ، عایق کاری متوسط	سیستم های تجمیعی اسپلیت/چیلر
اداری	T-OFF	۲۰٪	۵۰۴	۲۰۰	۳-۴	۱۳۸۵ تا کنون	نما شیشه ای/سنگ، فاقد عایق کاری، جداره U-VALUE ضعیف	چیلر تراکمی/بوiler مرکزی

*جامعه آماری این پژوهش، شامل کلیه پروانه های ساختمانی صادره 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 زیر بنای مصوب در این بازه حدود ۱ میلیون و ۷۰۰ هزار مترمربع در نظر گرفته شد. انتخاب این بازه زمانی بلند مدت، به جای یک سال خاص، باعث می شود تا نوسانات دوره های رکود و رونق ساخت و ساز در مدل لحاظ شده (مبنا برای ساخت و سازهای آینده شهر باشد) و نتایج تعمیم یافته، میانگین وزنی عملکرد ساختمان های شهر در دو دهه اخیر باشد. نمونه های ساختمانی مورد بررسی برای کالیبراسیون مدل، از میان پروژه های ساخته شده در سال های ۱۳۸۵ تا کنون انتخاب شده اند تا تنوع روش های اجرایی (از سنتی تا نیمه مدرن) را پوشش دهند.

۳.۳. کالیبراسیون مدل انرژی

مدل انرژی با Design Builder 7.0.2 و موتور Energy Plus 9.1 توسعه یافت (Crawley et al., 2001). کالیبراسیون با داده های واقعی مصرف برق و گاز (۱۲ ماه) مطابق (ASHRAE, 2020) ASHRAE Guideline 14 و با استفاده از شاخص های NMBE (معادله ۱) و CV(RMSE) (معادله ۲) انجام شد. دامنهی پذیرش این شاخص ها برای مدل های کالیبره شده در سطح ماهانه، به ترتیب $NMBE < 5\%$ و $CV(RMSE) < 15\%$ است (ASHRAE, 2020; Oraiopoulos & Howard, 2022). شاخص خطای میانگین نرمال شده را نشان داده و آن را محاسبه می کند:

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

که در معادله

M_i : مقدار اندازه گیری شده مصرف انرژی در دوره i

S_i : مقدار شبیه سازی شده مصرف انرژی در دوره i

$\bar{M}$: میانگین مقادیر اندازه گیری شده مصرف انرژی

n : تعداد داده های مورد استفاده در کالیبراسیون

p : تعداد پارامترهای تنظیم شده مدل

معادله (۲): ضریب تغییرات ریشه میانگین مربعات خطا

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

براساس داده های حاصل از کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل (جدول ۱) میزان NMBE ۰.۸۲ درصد و مقدار CV(RMSE) معادل ۳.۴ درصد است. مقادیر ارائه شده، مبین مقدار کمینه تر از آستانه پذیرش توصیه شده در ASHRAE Guideline 14 است. فرایند کالیبراسیون متکی به استفاده از ۱۲ ماه داده واقعی مصرف برق و گاز ساختمان های نمونه صورت گرفت. مقادیر NMBE=0.82% و CV(RMSE)=3.4% در محدوده پذیرش ASHRAE Guideline 14 قرار گرفتند. این نتایج دال بر تایید نتایج اعتبار مدل در مقیاس ساختمان های نمونه و دوره کالیبراسیون است. با این وجود باید دقت کرد که داده های مستقل و تفکیک شده برای کل ساختمان های شهر وجود ندارد. بر همین اساس نیز کالیبراسیون به عنوان اعتبار سنجی برآوردهای شهری محسوب نمی شود.

۳.۴ طراحی سناریوهای بهینه سازی انرژی

سوالات پژوهش دلالت بر خلاء بین وضع موجود و الزامات مبحث ۱۹ دارد و به استناد آن دو سناریوی اصلی تعریف شد: سناریوی وضعیت موجود بدون اقدام بهینه سازی و سناریوی بعدی اجرای کامل مبحث ۱۹ که بهبود عایق کاری پوسته، پنجره های Low-E سه جداره، بویلر چگالشی، سیستم سرمایش پربازده، روشنایی LED و سامانه ی مدیریت انرژی را در بر دارد. این گزینه عمدتاً مبتنی بر مطالعات پیشین در اقلیم های سرد (Asadi et al., 2012; Ma et al., 2012; Sadineni et al., 2011) و در چارچوب الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان است (National Building Regulations Office 2025)، که به واسطه آن صرفه جویی انرژی طبق معادله (۳) محاسبه خواهد شد.

معادله ۳

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

E_{Base} : مصرف سالانه انرژی ساختمان در وضعیت پایه (Baseline)

$E_{Scenario}$: مصرف سالانه انرژی ساختمان در سناریوی بهینه سازی

درهر سناریو انتشار آلاینده های محیطی و شاخص های اقتصادی علاوه بر مصرف انرژی ارزیابی گردید و در نهایت نتایج با سناریوی پایه قیاس شد.

برای ارزیابی اثرات سناریوی بهینه سازی ارتقاء یافته مبتنی بر مبحث ۱۹ (ویرایش پنجم) تعریف شد. مقادیر پارامترهای پوسته و تاسیسات منطبق بر الزامات گروه ساختمان های با آیتم های ذیل در نظر گرفته شد:

دیوارهای پیرامونی: عایق کاری حرارتی با ضریب انتقال حرارت $U=0.38 \text{ w/m}^2\text{k}$ (مطابق جدول الزامات گروه یک مبحث ۱۹)

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

پنجره ها : پنجره های سه جداره low-E با فریم UPVC و ضریب $U=1.8 \text{ w/m}^2\text{k}$ و $SHGC=0.4$

سیستم حرارتی (تاسیسات HVAC) : تعویض بویلر حرارتی با بویلر چگالشی با بازده ۹۴٪ و چیلر تراکمی با $COP=3.2$

سیستم روشنایی و مدیریت : استفاده از سیستم LED و کنترل هوشمند روشنایی (BEMS)

جدول ۳- انطباق اقدامات بهینه سازی با بندهای مشخص مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

اقدام بهینه سازی	بند مرتبط با مبحث ۱۹	مقدار استاندارد(مبحث ۱۹)	مقدار موجود(وضع پایه)	میزان بهبود
عایق کاری دیوارهای پیرامونی	بند ۱۹-۴-۱ (جدول الزامات پوسته)	$U \leq 0.38 \text{ W/M}^2\text{.K}$	$U \sim 1.20 \text{ W/M}^2\text{.K}$	کاهش انتقال ۶۸٪
تعویض پنجره با LOW-E سه جداره	بند ۱۹-۴-۳	$U \leq 1.8 \text{ W/M}^2\text{.K} \& SHGC \leq 0.4$	$U \sim 3.5 \text{ W/M}^2\text{.K}$	کاهش انتقال ۴۹٪
تعویض بویلر با بویلر چگالی	بند ۱۹-۶-۱	بازده $\geq 94\% (LHV)$	بازده $\sim 75\%$	افزایش بازده ۲۵٪
استفاده از چیلر تراکمی با COP بالا	بند ۱۹-۶-۲	$COP \geq 3.2$	$COP \sim 2.5$	افزایش بازده ۲۸٪
سیستم روشنایی LED+BEMS	بند ۱۹-۱۰-۱	چگالی توان $\geq 6 \text{ W/M}^2$	چگالی توان $\sim 12 \text{ W/M}^2$	کاهش ۵۰٪ مصرف روشنایی

جدول ۴. طبقه بندی سناریوهای بهینه سازی مورد استفاده در پژوهش

سناریو	نوع راهکار	هدف اصلی
Baseline	وضعیت موجود	مینای مقایسه
سناریوهای غیرفعال	بهبود پوسته حرارتی ساختمان	کاهش بار گرمایش و سرمایش
سناریوهای فعال	ارتقای سیستم های HVAC و روشنایی	افزایش بهره وری انرژی
سناریوهای انرژی تجدیدپذیر و مدیریت مصرف	استفاده از فناوری های نوین و کنترل مصرف	کاهش مصرف انرژی و انتشار آلاینده
سناریوی ترکیبی	اجرای هم زمان راهکارهای منتخب	دستیابی به بیشترین صرفه جویی انرژی

۳.۵ ارزیابی انرژی، محیط زیستی و اقتصادی سناریوهای بهینه سازی

بر اساس مصرف برق ، گاز طبیعی و ضرایب انتشار بومی شده، میزان انتشار آلاینده های CO_2 ، SO_2 و $PM_{2.5}$ محاسبه شد. (جدول ۵) و لازم به ذکر است که ضرایب انتشار برق از Peyvandi et al. (2023) و ضرایب گاز از IPCC (2022) به دست آمده است. همچنین برای ارزش گذاری اقتصادی کاهش آلاینده ها، از رویکرد هزینه های خارجی (External Cost) و روش مسیر اثر (Impact Pathway Approach) به استناد گزارش CE Delft (2024) و گزارش EEA (2024) استفاده شد. شاخص های اقتصادی شامل دوره ی بازگشت سرمایه (PB) ، ارزش فعلی خالص (NPV) و نرخ بازده داخلی (IRR) با نرخ تنزیل

۱۰٪ و دوره‌ی ۱۰ ساله محاسبه شد (Blank & Tarquin, 2018; Copiello et al., 2017; Fregonara & Ferrando 2023), (معادلات ۴، ۵ و ۶)

$$CO_{2,Electricity} = E_{Electricity} \times EF_{Electricity}$$

$$CO_{2,Gas} = E_{Gas} \times EF_{Gas}$$

$$CO_{2,Total} = CO_{2,Electricity} + CO_{2,Gas}$$

در این معادلات: $E_{Electricity}$ میزان مصرف سالانه برق ساختمان

E_{Gas} : میزان مصرف سالانه گاز طبیعی ساختمان

$EF_{Electricity}$: ضریب انتشار دی اکسید کربن مربوط به برق

EF_{Gas} : ضریب انتشار دی اکسید 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 دی اکسید کربن

در چارچوب توجیه پذیری اقتصادی اجرای سناریوها، پرداختن به برآورد هزینه اولیه اجرایی هر راهکار، میزان صرفه جویی سالانه هزینه انرژی نیز محاسبه می شود. سه شاخص اقتصادی دوره 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 امر، معادله‌ی (۷) برای دوره بازگشت سرمایه، مطابق از نسبت هزینه سرمایه گذاری اولیه به صرفه جویی سالانه هزینه انرژی لحاظ گردید.

معادله ۷ (دوره بازگشت سرمایه)

$$PB = I / S$$

که در آن:

I : هزینه اولیه اجرای سناریوی بهینه سازی

S : صرفه جویی سالانه هزینه انرژی

به منظور ارزیابی اقتصادی در دوره بهره برداری، ارزش فعلی خالص بر اساس جریان های نقدی سالانه و نرخ تنزیل مطابق رابطه (۸) محاسبه شد.

معادله ۸ (ارزش فعلی خالص)

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

در این معادله CF_t : جریان نقدی خالص در سال t

r : نرخ تنزیل

t : دوره زمانی تحلیل اقتصادی

n : طول دوره 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 رابطه (۹) محاسبه شد.

معادله 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 : دوره زمانی تحلیل اقتصادی

n : طول دوره تحلیل اقتصادی

I : سرمایه‌گذاری اولیه

ادبیات موضوعی محدوده متداول نرخ تنزیل اجتماعی ۷٫۳ تا ۱۵ درصد در کشورهای در حال توسعه و نرخ تنزیل ۱۰ درصد با عنایت 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 دوره بهره‌برداری پروژه برای محاسبه 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 هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در سال مد نظر و محاسبات تحلیل حساسیت نسبت به نرخ تنزیل در محدوده 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 SO_2 ، NO_x و

PM_{2.5} نیز بر اساس مطالعات Nazari et al. (2010) و پژوهش‌های به‌روزشده داخلی (Peyvandi et al., 2023) تعیین شدند. ضرایب انتشار گاز طبیعی نیز بر مبنای مقادیر پیش‌فرض IPCC (2022) 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 CO₂، SO₂، NO_x و PM_{2.5} بر اساس راهنمای CE Delft (2024)، گزارش هزینه‌های خارجی کمیسیون اروپا (European Commission, 2019) و با اعمال ضرایب تعدیل برای شرایط ایران تعیین شدند. (برای CO₂، هزینه خارجی در بازه ۱۰۰ تا ۱۶۴ یورو به ازای هر تن در نظر گرفته شد و هزینه آلاینده‌های محلی بر اساس رویکرد مسیر اثر (Impact Pathway Approach)، مقادیر مرجع CAFE و داده‌های به‌روزشده EEA (2024) محاسبه گردید.

محاسبه ارزش اقتصادی خسارت اجتناب‌شده برای هر آلاینده

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

که در آن EC_j ارزش اقتصادی خسارت اجتناب‌شده ناشی از آلاینده j ، ΔE_j میزان کاهش انتشار آن آلاینده نسبت به سناریوی پایه، و UC_j هزینه خارجی واحد آلاینده بر حسب یورو به ازای هر تن است. مجموع منفعت محیط‌زیستی نیز از جمع ارزش خسارت اجتناب‌شده چهار آلاینده به دست آمد.

جدول ۵. ضرایب انتشار و هزینه‌های خارجی محیط زیستی

آلاینده	ضریب انتشار برق (kg/MWh)	ضریب انتشار گاز طبیعی (kg/GJ)	هزینه خارجی (یورو/تن)	منبع
CO ₂	۶۲۳	۵۶،۱	۱۰۰-۱۶۴	Peyvandi et al. (2023); CE Delft (2024); European Commission (2019)
SO ₂	۲،۱۵	۰،۰۰۵	۲،۰۰۰-۶،۰۰۰	Nazari et al. (2010); EEA (2024); CE Delft (2024)
NO _x	۱،۷۸	۰،۰۴۸	۲،۵۰۰-۷،۵۰۰	Nazari et al. (2010); EEA (2024); CE Delft (2024)
PM _{2.5}	۰،۴۷	۰،۰۰۱۵	۱۵،۰۰۰-۵۰،۰۰۰	EEA (2024); CE Delft (2024); WHO (2023)

۳.۶ تحلیل حساسیت و دامنه تغییرات پارامترها

تحلیل حساسیت یک‌طرفه برای سه پارامتر کلیدی (U-value) پوسته، قیمت حامل‌های انرژی، ضریب انتشار CO₂ برق (با دامنه‌ی تغییرات $\pm 20\%$ نسبت به مقدار پایه (جدول ۱۰) و دو پارامتر تاثیرگذار 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 CO₂ و NPV در برابر عدم قطعیت ورودی‌ها و تاثیرگذاری نرخ تنزیل و عمر مفید در حالت بدبینانه بود. در ادامه پژوهش با در نظر گیری 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 CO₂ و اثر قیمت انرژی بر NPV تجزیه و تحلیل 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 گردید. میزان حساسیت هر خروجی از طریق مقایسه مقدار حاصل در هر سناریو با مقدار متناظر در حالت پایه تعیین شد؛ به‌نحوی 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، به‌عنوان ارزیابی حساسیت نتایج به مفروضات ورودی به‌کار رفت.

۴. نتایج

۴.۱ اعتبارسنجی مدل انرژی ساختمان نمونه

جدول (۶) داده‌های دقت مدل انرژی ساختمان نمونه، با مقایسه نتایج شبیه‌سازی پس از کالیبراسیون با داده‌های واقعی مصرف انرژی مورد ارزیابی را نشان می‌دهد و مبتنی بر داده‌های مذکور، 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 این که خطای برآورد انتشار دی‌اکسیدکربن کمتر از ۲ درصد محاسبه گردید. این مقادیر تایید می‌کنند که مدل، انطباق مناسبی با داده‌های واقعی دارد. در نهایت با استنتاج از اعتبار سنجی، مدل کالیبره شده ی قابلیت پذیرش به عنوان مبنای توسعه مدل انرژی شهری و ارزیابی سناریوهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شد.

جدول ۶. نتایج اعتبارسنجی مدل انرژی ساختمان نمونه

منبع	دامنه‌ی پذیرش	مقدار	شاخص
ASHRAE (2020); Oraipoulos & Howard (2022)	<5%	<۱	NMBE (%)
	<15%	3.4	CV(RMSE) (%)
	-	۳.۳	MAPE (%)
	-	۷۹۰۰	RMSE (kWh/year)
	<۲		خطای برآورد انتشار CO ₂ (%)

۴.۲ نتایج مدل انرژی شهری در سناریوی پایه

اجرای مدل نشان داد الگوی مصرف انرژی متأثر از کاربری‌های مختلف، تفاوت شایان توجه ای را به نمایش می‌گذارد. ساختمان‌های تجاری با مقدار ۲۲۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع بیشترین شدت مصرف سالانه 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 می‌باشد.

جدول ۷. نتایج سناریوی پایه مدل انرژی شهری

کاربری	شدت مصرف انرژی (kWh/m ² .year)	گرمایش (%)	سرمایش (%)	روشنایی (%)	بازده تجهیزات	کیفیت عایق
مسکونی	180	45	28	12	پایین	ضعیف
تجاری	220	27	35	25	متوسط	متوسط
اداری	200	35	30	20	متوسط	ضعیف

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

۴.۴ تغییرات انتشار آلاینده‌ها در سناریوی بهینه‌سازی

مشخصاً 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 آلودگی در مقیاس شهری است. از نظر مقدار جرمی دی‌اکسیدکربن (CO₂) بیشترین کاهش را در میان آلاینده‌های بررسی‌شده داشت، البته انتشار آلاینده‌های SO₂، NO_x و PM_{2.5} نیز به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت (جدول ۸).

جدول ۸ - کاهش سالانه 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	۴۲۰۰۰	۲۹۵۰۰	۱۲۵۰۰	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 CO₂ بیشترین مقدار عددی (۱۲۵.۰۰۰ تن) را به خود اختصاص داده است اما آنچه حائز اهمیت می باشد عبارت است از این که به لحاظ منظر اثرات سلامت محور، کاهش ۳۰ درصدی PM_{2.5}، ۳۲.۵ درصدی NO_x و 26.9 درصدی SO₂ بسیار تعیین کننده است. اگرچه ارزیابی دقیق غلظت اتمسفری آلاینده ها نیازمند مدل سازی پراکنش جوی است، اما این کاهش ۳۰ درصدی در بار انتشار جرمی PM_{2.5} و NO_x در مبدا، گامی مهم در جهت تحقق هدف گذاری های کیفیت هوای سازمان بهداشت جهانی (WHO) در مقیاس شهری محسوب می شود. بر اساس ضرایب هزینه های خارجی دانشگاه دلفت هلند و گزارش EEA ۲۰۲۴ ارزش اقتصادی سالانه ی کاهش این آلاینده های محلی به جز CO₂ حدود ۳,۰۷۳ میلیارد ریال برآورد می شود (EEA, 2024; CEDelft, 2024). عمده این رقم ناشی از کاهش ارزش اقتصادی هزینه های درمانی و افزایش بهره وری نیروی کار است. این یافته تحقیق به سؤال مرتبط با بررسی درباره ی «هزینه های سلامت ناشی از خلاء اجرایی مبحث ۱۹» پاسخ مستقیمی می دهد.

۴.۵ اعتبارسنجی نتایج در مقیاس شهری

خروجی ساختمان نمونه در چارچوب رویکرد Prototype-based UBEM به منظور ارزیابی قابلیت گسترده گی نتایج، به ساختمان های شهری (مسکونی، اداری و تجاری) شهر قزوین تعمیم داده شد. اعتبار مدل در سطح ساختمان نمونه بر اساس داده های واقعی مصرف انرژی و شاخص های NMBE، CV(RMSE) و MAPE و مطابق معیارهای ASHRAE Guideline 14 تأیید شد. اگر چه ترازنامه ی انرژی استان قزوین (سال ۱۴۰۱) به صورت تجمیعی در دسترس است، اما این ترازنامه ها فاقد تفکیک بر اساس کاربرهای مسکونی، تجاری و اداری بوده و نیز مصرف انرژی را در سطح استان (نه صرفاً شهر قزوین) گزارش می کند. از سوی دیگر روش محاسبه مصرف در ترازنامه مبتنی بر عوامل بالادستی (کل فروش حامل های انرژی) است و با رویکرد پایین به بالای (bottom-up) مدل سازی نمونه محور این پژوهش قابل قیاس نیست، لذا به کارگیری آن برای اعتبارسنجی تفکیک شده ی شهری امکان پذیر نمی باشد؛ و بدین منظور از روش شاخص شباهت تیپولوژیک (Typological Similarity Index) بر اساس مطالعه (Shen & Wang 2024) برای بررسی سازگاری ساختمان های نمونه با تیپ های هدف استفاده شد.

جدول ۹- خلاصه اعتبارسنجی مدل در سطوح مختلف

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

۴.۶ تحلیل حساسیت و عدم قطعیت

در این بخش سه پارامتر کلیدی بررسی گردید. این پارامترها عبارت بودند از: ضریب انتقال حرارت پوسته (U-value)، قیمت حامل های انرژی و ضریب انتشار CO₂ برق. به علاوه برای ارزیابی استواری نتایج با فرض دامنه تغییرات هر پارامتر برابر $\pm 20\%$ نسبت به مقدار پایه و همچنین اثر آن بر مصرف انرژی شهری، کاهش انتشار CO₂ و ارزش فعلی خالص (NPV) بررسی گردید.

نتایج با فرض ثابت نگه داشته شدن سایر پارامترها نشان داد که مصرف انرژی شهری بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات-U-value دارد و بهبود ۲۰٪ در عملکرد حرارتی پوسته، موجب کاهش حدود ۱۰٪ مصرف انرژی خواهد شد. همچنین مشخص شد NPV، بیشترین وابستگی را به قیمت حامل‌های انرژی دارد و کاهش ۲۰٪ قیمت انرژی، موجب کاهش حدود ۲۸٪ در مقدار NPV خواهد گردید. با وجود این تغییرات، مثبت باقی ماندن NPV در تمامی حالت‌ها نشان‌دهنده پایداری اقتصادی سناریوی بهینه‌سازی یکپارچه بوده و در نتیجه و بر اساس نتایج، تغییرات انتشار CO₂ متناسب با تغییر ضریب انتشار برق و به صورت تقریباً خطی مشاهده خواهد شد.

علاوه بر سه پارامتر کلیدی فوق دو پارامتر تاثیرگذار در تحلیل حساسیت یک طرفه عنوان شد که نتایج حاصل از آن نیز می‌تواند دلیلی بر پایداری اقتصادی سناریوی بهینه‌سازی یکپارچه گردد. این دو پارامتر منطبق بر جدول شماره (۱۱) محاسبه گردید.

جدول ۱۰- نتایج تحلیل حساسیت یک طرفه 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 ۱۱- نتایج تحلیل حساسیت یک طرفه نسبت به نرخ تنزیل و عمر مفید پروژه (تاثیر بر NPV)

متغیر تحلیل	مقدار پایه	دامنه 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 (خوش بینانه)	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 بدبینانه ترین حالت (نرخ تنزیل ۲۰٪ 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 ۲۰ درصدی قیمت حامل‌های انرژی)، دوره‌ی بازگشت سرمایه از ۰,۷۵ به ۰,۹۴ سال افزایش یافته و NPV با کاهش ۲۸ درصدی مواجه می‌شود، اما همچنان مثبت باقی می‌ماند (۱۵,۲۰۰ میلیارد ریال). اگر چه محاسبات NPV با نرخ تنزیل ۱۰٪ در تمامی سناریوها مثبت باقی می‌ماند، اما در شرایط اقتصادی ایران با نرخ تورم مزمن بالای ۳۰٪ نرخ سود تسهیلات بانکی حدود ۲۰-۲۵٪ 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٪ را انتظار دارند. همان گونه که نتایج تحلیل حساسیت نشان داد (جدول ۱۰)، افزایش نرخ تنزیل به ۲۰٪ ارزش فعلی خالص را حدود ۴۲٪ کاهش می دهد (از ۲۱۰۱۲ به ۱۲۰۱۰۰ میلیارد ریال). بنابراین، بدون اعمال مشوق های مالی ۱۵ تا ۲۰ درصدی، پروژه ی بهینه سازی برای سرمایه گذاران محافظه کار که به دنبال بازدهی متناسب با ریسک سیستماتیک ایران هستند، توجیه کافی را نخواهد داشت و مشوق های مذکور نقش جبران کننده خلاء بین نرخ تنزیل اجتماعی (۱۰٪) و نرخ بازده مورد انتظار بازار (۲۵-۳۰٪) را ایفا می کند، از این رو با استناد به این یافته و مطابق با رویکرد Copiello et al. (2017) و Mostafazadeh et al. (2023)، مؤید آن است که ارائه ی حداقل مشوق های مالی معادل ۱۵ تا ۲۰ درصد از کل هزینه ی سرمایه گذاری اولیه (حدود ۴۱۰ تا ۵۵۰ میلیارد ریال) می تواند کاهش ریسک و بهبود جذابیت نسبی سرمایه گذاری را در شرایط رکود قیمتی اصلاح کرده و انگیزه ی لازم برای اجرای کامل الزامات مبحث ۱۹ را فراهم آورد.

یافته های تحقیق حکایت از آن دارد که تغییرات قیمت انرژی بیشترین اثر را بر شاخص اقتصادی NPV می گذارد. در بدترین حالت (کاهش ۲۰٪ قیمت انرژی)، سناریوی بهینه سازی 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 یک طرفه تبیین کننده آن است که یافته های اصلی صرفه جویی مابین 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 تعریف شده این تحقیق، یافته های پژوهش نشان داد که فاصله عملکردی قابل توجه ای میان وضعیت موجود ساختمان های مورد مطالعه و سناریوی تعریف شده متأثر از مبحث ۱۹ وجود دارد. شکل گیری کاهش به میزان تقریبی ۴۶.۵ درصدی مصرف انرژی در سناریوی ترکیبی نشان از آن دارد که بخش مهمی از این فاصله حاصل عملکرد پوسته و سامانه های انرژی ساختمان است. این موضوع نشان می دهد در صورت مداخله هم زمان در مؤلفه های غیرفعال، فعال و مدیریت مصرف، نسبت به اقدامات منفرد ظرفیت بیشتری برای کاهش تقاضای انرژی دارد. (Ang et al., 2020) میزان کاهش محاسبه شده در این تحقیق با جهت گیری کلی نتایج مطالعات بین المللی UBEM هم راستا است. این مطالعات نیز بیانگر آن هستند که در صورت مداخله یکپارچه در پوسته و سامانه های انرژی، در مقایسه با اقدامات منفرد، ظرفیت بیشتری برای کاهش تقاضای انرژی در مقیاس ساختمان های شهری دارند (Suppa & Ballarini, 2023; Luo et al., 2025). علیرغم این نتیجه نباید فراموش کرد که هر گونه تفاوت در اقلیم، ویژگی های ساختمان ها و ترکیب سناریوهای بهسازی، مقادیر کاهش را تغییر خواهد داد.

نتایج حکایت از آن دارد که برآورد صرفه جویی شهری در دامنه ۶۴۸ تا ۷۹۲ گیگاوات ساعت در سال، حاصل تعمیم تیپولوژیک نتایج ساختمان های نمونه به موجودی هدف است. این دست آورد باید به عنوان برآورد سناریو محور، 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 هم راستا است. این هم راستایی نشان می دهد که بسته های ترکیبی می توانند در ساختمان های دارای ضعف پوسته و سامانه های نسبتاً کم بازده، کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی ایجاد کنند. بر همین اساس میزان کاهش انرژی به دست آمده نیز در دامنه طیفی قرار می گیرد که در مطالعات بهسازی ساختمان گزارش شده است؛ دامنه ای که بسته به عمق مداخله، ویژگی های ساختمان و ترکیب اقدامات می تواند تفاوت قابل توجهی داشته باشد (Fregonara et al., 2017).

در این پژوهش NPV با نرخ تنزیل ۱۰٪ محاسبه شده، اما سرمایه گذاران در شرایط تورمی ایران، نرخ بازده حداقلی حدود ۲۵-۳۰٪ را انتظار دارند. با افزایش نرخ تنزیل به ۲۰٪، NPV به حدود ۱۲۰۰۰ میلیارد ریال کاهش می یابد (جدول ۱۰). بنابراین مشوق های مالی ۱۵ تا ۲۰ درصد نه برای جبران هزینه، بلکه برای جبران ریسک سیستمی، ریسک کاهش قیمت حامل های انرژی در آینده و ترغیب سرمایه گذاران محافظه کار پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که ارزیابی اقتصادی پروژه های بهسازی انرژی از مفروضاتی مانند نرخ تنزیل، قیمت انرژی و افق ارزیابی تأثیر پذیر است. بنابراین هر تغییری در این پارامترها می تواند نتیجه ارزیابی مالی را به شکلی معنی داری تغییر دهد (Fregonara et al., 2017).

از چشم انداز محیطی، کاهش مصرف انرژی منجر به کاهش هم زمان انتشار CO_2 ، SO_2 ، NOx و $PM_{2.5}$ می گردد. ارتباط مستقیم بین بهبود عملکرد انرژی ساختمان ها با کاهش بار آلودگی شهری را می توان از این قضیه استنباط نمود. این خروجی ها نشان می دهد بر خلاف مطالعات پیشین که تمرکز عمده بر CO_2 بوده، در نظر گرفتن هم زمان آلاینده های محلی امکان تحلیل جامع تر پیامدهای محیط زیستی ناشی از کاهش انتشار در مبدأ را فراهم کرده است و با روندهای جدید توسعه UBEM که مبتنی بر شاخص های چندگانه می باشد سازگار خواهد بود (Kong et al., 2023; Salvalai et al., 2024).

ارزیابی اقتصادی پروژه های بهینه سازی انرژی به نرخ تنزیل، طول عمر پروژه و عدم قطعیت داده های ورودی وابسته است (Tavakolan et al., 2022). مبنای محاسبات مبتنی است بر نرخ تنزیل اجتماعی در کشورهای در حال توسعه (۷٫۳ تا ۱۵ درصد) (Turan & Gurluk, 2024)، شرایط اقتصادی کشور (نرخ تورم بالا)، فرضیات محافظه کارانه ای محاسبه NPV و نرخ تنزیل ۱۰ درصد و عمر مفید ۱۰ سال.

تحلیل حساسیت یک طرفه پنج پارامتر کلیدی شامل U-value، قیمت انرژی، ضریب انتشار CO_2 برق با دامنه تغییرات $\pm 20\%$ نرخ تنزیل (با دامنه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) و عمر مفید پروژه (با دامنه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال) را در بر می گیرد. نتایج مشخص می کند که حتی در بدبینانه ترین حالت (نرخ تنزیل ۲۰٪ 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 که مصرف انرژی شهری بیشترین حساسیت را نسبت به U-value دارد؛ به طوری که بهبود ۲۰٪ در عملکرد حرارتی پوسته، مصرف انرژی را حدود ۱۰٪ کاهش می دهد. بررسی ها نشان می دهد که اهمیت عملکرد حرارتی پوسته با نتایج مطالعات مستقل در یک راستا قرار داد. چنانکه Yun et al. (2024) نشان دادند که تغییرات واقعی U-value ساختمان های موجود می تواند بر برآورد پتانسیل صرفه جویی 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 حالت ها مثبت باقی ماند (۱۵،۲۰۰ تا ۲۶،۸۰۰ میلیارد ریال). با اتکا به تحلیل حساسیت می توان اظهار داشت در سناریوی کاهش ۲۰ درصدی قیمت انرژی، دوره بازگشت سرمایه به ۰٫۹۴ سال افزایش می یابد و برای حفظ جذابیت اقتصادی، نیاز به مشوق های مالی معادل ۱۵ تا ۲۰ درصد هزینه سرمایه گذاری (۴۱۰ تا ۵۵۰ میلیارد ریال) احساس می شود. اهمیت ساز و کارهای اقتصادی مکمل در تصمیم گیری برای بازسازی انرژی ساختمان ها نیز در مطالعات پیشین مورد تأکید قرار گرفته است (Mostafazadeh et al., 2023). همان گونه که انتظار می رفت نتایج تحلیل حساسیت نشان داد توجه پذیری اقتصادی سناریوی بهینه سازی نسبت به قیمت انرژی و نرخ تنزیل حساس است. اگرچه NPV در سناریوهای بررسی شده مثبت باقی می ماند، یا افزایش نرخ بازده مورد انتظار سرمایه گذار، کاهش قیمت انرژی می تواند منجر به کاهش جذابیت نسبی سرمایه گذاری گردد. مبتنی بر همین نتیجه به نظر می رسد که می توان مشوق مالی ۱۵ تا ۲۰ درصدی را تحت سناریوی حمایتی برای کاهش ریسک سرمایه گذاری و بهبود

جذابیت اقتصادی تفسیر نمود. البته این موضوع به معنای پذیرش آن به عنوان آستانه قطعی و بی نظیر اجرای مبحث ۱۹ تلقی نمی گردد.

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

در زمان نبود داده‌های اندازه‌گیری شده در مقیاس کل وضع موجود ساختمان‌های شهری (مسکونی، تجاری و اداری) اعتبارسنجی مدل در سطح ساختمان نمونه را تبدیل به مهمترین محدودیت‌های پژوهش می‌کند. این پژوهش بستر نهادی و نقش دستگاه‌های متولی همچون شهرداری، نظام مهندسی ساختمان و وزارت نیرو در اجرای مبحث ۱۹ را بررسی نکرده است. این مسأله، به‌ویژه در پاسخ به سوال مرتبط با (محور سیاستی) اهمیت پیدا می‌کند. ارائه‌ی مدل اصلاحی برای ساز و کارهای نظارتی و تشویقی می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی باشد. بررسی‌ها حاکی از 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. توسعه مدل‌های پویا، استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و تلفیق داده‌های سامانه‌های هوشمند ساختمان می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی در نظر گرفته شود. این پژوهش‌ها باید نشان دهند تا چه میزان این داده‌ها می‌تواند 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 که خلاء بین عملکرد وضع موجود و الزامات مبحث ۱۹، به‌گونه‌ای است که اجرای سناریوی منطبق با الزامات فنی آن می‌تواند مصرف انرژی را ۴۶.۵ درصد (دامنه ۶۴۸ تا ۷۹۲ گیگاوات‌ساعت در مقیاس شهری) کاهش دهد. این کاستی، انتشار آلاینده‌های CO_2 ، SO_2 ، NO_x و $PM_{2.5}$ را در سناریوی بهینه‌سازی به‌ترتیب از میزان ۴۲۰۰۰۰، ۱۴۵۰، ۱۲۰۰ و ۳۲۰ تن در سال به مقدار ۲۹۵۰۰۰، ۱۰۶۰، ۸۱۰ و ۲۲۴ تن در سال (کاهش مطلق آیت‌ها به ترتیب ۱۲۵۰۰۰، ۳۹۰، ۳۹۰ و ۹۶ تن در سال) کاهش داده و ارزش اقتصادی تقلیل آلاینده‌ها به‌جز CO_2 ، معادل ۳۰۷۳ میلیارد ریال برآورد می‌شود. لذا به نوعی اثر مستقیم آن بر کسر بالقوه هزینه‌های خارجی مرتبط با سلامت بر اساس رویکرد Impact Pathway و افت بار انتشار آلاینده‌ها در مبدأ خواهد بود. لیکن ارزیابی دقیق غلظت آلودگی‌های ناشی از پراکنش جوی می‌باشد که در این پژوهش به آن پرداخته نشده است. نهایتاً در جمع‌بندی نهایی تحقیق، تحلیل حساسیت نشان داد که در شرایط کاهش ۲۰ درصدی قیمت انرژی، ارائه‌ی حداقل مشوق‌های مالی معادل ۱۵ تا ۲۰ درصد هزینه‌ی سرمایه‌گذاری (۴۱۰ تا ۵۵۰ میلیارد ریال)، می‌تواند به‌عنوان 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 عنایت به اینکه کاهش ۲۰٪ قیمت انرژی NPV را ۲۸٪ کاهش می‌دهد. به نظری رسید 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 تاثیر (۱۰٪) کاهش مصرف) را دارد، از این رو اقدامات مرتبط با بهبود عملکرد حرارتی پوسته می‌تواند در اولویت بررسی برای بهسازی قرار گیرند. لذا در صورتی که پایگاه داده‌ی 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 ساز و کارهای نظارتی مبحث ۱۹ بررسی نشده است که می تواند در دستور کار پژوهش‌های آینده قرار گیرد.

مشارکت نویسندگان:

نویسندگان در انجام تمام بخشهای این مقاله سهم برابر داشته اند.

قدردانی و تشکر

نویسندگان در فرایند آماده‌سازی مقاله از دیپ سیک ورژن ۴.۵ صرفاً برای کمک به اصلاح خطاهای املائی 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 به‌وسیله نویسندگان بررسی شده و مسئولیت کامل محتوای علمی، داده‌ها، تحلیل‌ها، نتایج و نسخه نهایی مقاله بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می دارند 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.jobbe.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](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. Contribution of Working Group III 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 future 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 between 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 Eirdmoussa, 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 CO₂, SO₂ and NO_x emission factors in Iran's thermal power plants. *Energy*, 35(7), 2992–2998. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.025>
- Oraopoulos, 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.jobbe.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.jobbe.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>

