Urban Economics
Vol. 11, No. 1, (2026)
http://ue.ui.ac.ir
10.22108/ue.2025.147403.1332

اقتصاد شهری
دوره ۱۱، شماره ۱، توالی ۱۹، سال ۱۴۰۵
صص: ٦٦- ۵۱
مقاله پژوهشی

Systematic Analysis of Energy Consumption Optimization Solutions in Urban Environments: A Framework for Isfahan Development Management

Sahar Nazari [1], Moghadi Khodabakhshian Konaraki[2*]
1 PhD student in Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Islamic Azad University of Isfahan (Khorasgan) Branch, Isfahan, Iran
2- Assistant Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Islamic Azad University, Isfahan Branch (Khorasgan), Isfahan, Iran

Abstract: Buildings contribute significantly to energy production and carbon dioxide emissions, and experts are looking for ways to reduce this, focusing on eco-friendly design strategies. In this regard, the present study aims to systematically analyze energy consumption optimization strategies in urban environments as a framework for the development management of Isfahan. The present study is a review type, and a systematic literature review method was used to collect data, and a content analysis method was used to analyze them. The statistical population includes sources from 2011 to 2023. The present research method is based on a systematic literature review, which consists of five stages: definition, search, selection, analysis, and synthesis. Based on the research findings, a total of 17 components regarding energy consumption optimization solutions in urban environments, including double-skin facade; building orientation; building form; optimizing wall insulation thickness; optimizing wall-to-window ratio; optimizing window thickness; wireless network sensor; Wall height; existence of adjacent buildings; roofing materials; thermal comfort; passive cooling and heating; energy-based planning for a site; alternative energy sources; multi-objective optimization; light and canopy have been extracted. Additionally, this research investigates the orientation of Group C residential buildings as a key factor influencing energy efficiency in the city of Isfahan. The results of the research show that the energy saving potential with the appropriate orientation of Group C residential apartment buildings in the Isfahan region for total energy consumption is 32 percent, and the optimal building orientation in the city of Isfahan in terms of energy consumption is the southern orientation.
Key Words: Residential Use, building Orientation, Architectural Solutions, Energy Consumption Optimization, Urban Environment.

تحلیل سیستماتیک راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در محیط‌های شهری: چارچوبی برای مدیریت توسعهٔ اصفهان

سحر نظری[۱]، مقدی خدابخشیان کنارکی [۲*]
۱- دانشجوی دکتری معماری، دانشکده معماری وشهرسازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران
۲- استادیار دانشکده معماری وشهرسازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲

چکیده

ساختمان‌ها سهم زیادی در تولید انرژی و تولید دی‌اکسید کربن دارند. بر این اساس، متخصصان به دنبال استفاده از راهکارهایی برای کاهش این امر هستند و در این راستا، بر استفاده از راهبردهای طراحی سازگار با محیط‌زیست متمرکز شده‌اند. در این راستا، هدف پژوهش حاضر تحلیل سیستماتیک راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در محیط‌های شهری به عنوان چارچوبی برای مدیریت توسعهٔ اصفهان است. پژوهش حاضر از نوع مروری است و برای جمع‌آوری داده‌ها از روش مرور سیستماتیک ادبیات و برای تحلیل آنها از شیوهٔ تحلیل محتوا استفاده شده است. جامعهٔ آماری شامل منابع سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۳ است. روش پژوهش حاضر مبتنی بر مرور سیستماتیک ادبیات است که متشکل از پنج مرحله از جمله تعریف، جست‌وجو، انتخاب، تحلیل و سنتز است. بر اساس یافته‌های پژوهش، در مجموع ۱۷ مؤلفه در خصوص راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در محیط‌های شهری از جمله نمای دوپوسته؛ جهت‌گیری ساختمان؛ فرم ساختمان؛ بهینه‌سازی ضخامت عایق دیوار؛ بهینه‌سازی نسبت دیوار به پنجره؛ بهینه‌سازی ضخامت پنجره؛ حسگر شبکهٔ بی‌سیم؛ ارتفاع دیوار؛ وجود ساختمان مجاور؛ مصالح بام؛ آسایش حرارتی؛ سرمایش و گرمایش غیرفعال؛ برنامه‌ریزی مبتنی بر انرژی برای یک سایت؛ منابع انرژی جایگزین؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ نور و سایبان استخراج شده‌اند. همچنین، در این پژوهش، جهت‌گیری ساختمان‌های مسکونی گروه ج به عنوان مؤلفهٔ تأثیرگذار بر کارایی انرژی در شهر اصفهان بررسی شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد پتانسیل صرفه‌جویی انرژی با جهت‌گیری مناسب ساختمان‌های مسکونی آپارتمانی گروه ج در اقلیم اصفهان برای مصرف انرژی کل ۳۲ درصد است و جهت‌گیری بهینهٔ ساختمان در شهر اصفهان از نظر مصرف انرژی، جهت‌گیری جنوبی است.

واژه‌های کلیدی: کاربری مسکونی، جهت‌گیری ساختمان، راهکارهای معماری، بهینه‌سازی مصرف انرژی، محیط شهری.

این مقاله برگرفته از رساله ی دکتری نویسنده اول به راهنمایی نویسنده ی دوم در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) است

*** Corresponding Author**: Moghadi Khodabakhshian Konaraki
E-mail address: meg.kh@khuisf.ac.ir

2588-4867/ © 2026 University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

مقدمه

ساختمان‌ها در سطح جهان ۳۰ تا ٤٠ درصد از کل انرژی را مصرف و ۳۰ درصد از دی‌اکسید کربن را منتشر می‌کنند. مصرف انرژی در سراسر جهان تقریباً ۲ تا ۳ درصد، یعنی دوبرابر میانگین نرخ رشد از سال ۲۰۱۰، افزایش یافته است که علت آن اقتصاد قوی جهانی و همچنین افزایش نیاز به انرژی سرمایش و گرمایش است. بخش ساختمان مسئول حدود ۵۵ درصد از مصرف برق جهانی است (Santamouris &Vasilakopoulou, 2021). ساختمان‌ها مانند مدارس، رستوران‌ها، هتل‌ها، بیمارستان‌ها، موزه‌ها و سایر ساختمان‌ها دارای تنوعی وسیع از کاربری‌ها و نیازهای انرژی مانند روشنایی، گرمایش، تهویه، تهویهٔ مطبوع، آب گرم خانگی، یخچال، آماده‌سازی غذا و غیره هستند. رشد اقتصادی و جمعیت باعث افزایش تقاضا برای خدمات در حوزهٔ مراقبت‌های بهداشتی، آموزشی، فرهنگی، مهمان‌نوازی و غیره همراه با مصرف انرژی می‌شود (Pérez-Lombard et al., 2008).

در سال ۲۰۱۸، برنامهٔ محیط‌زیست سازمان ملل متحد گزارش داد ساختمان‌ها در سراسر جهان مسئول ٤٠ درصد از کل مصرف انرژی جهان، ۲۵ درصد از آب جهانی و ٤٠ درصد از منابع جهانی هستند و حدود یک‌سوم گازهای گلخانه‌ای را منتشر می‌کنند؛ بنابراین، اولویت بر کاهش اثرات زیست‌محیطی بر محیط انسان‌ساخت قرار گرفت. صرفه‌جویی در مصرف انرژی ساختمان‌ها دارای مزایایی مختلف از جمله کاهش هزینه‌ها، افزایش امنیت تأمین و صرفه‌جویی در محیط‌زیست است. بر اساس گزارش هیئت بین‌دولتی تغییرات آب‌وهوایی، ساختمان‌ها ۱۹ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با انرژی، ۳۲ درصد از مصرف جهانی انرژی و ۵۷ درصد از مصرف جهانی برق را تشکیل می‌دهند؛ از این رو، ساختمان‌ها از نظر مصرف انرژی یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های جامعهٔ مدرن هستند. ساختمان‌های مسکونی و تجاری به دلیل بهره‌برداری از انرژی اولیه، ٤١/١ درصد در مصرف انرژی اولیه، ٧٤ درصد در مصرف برق و ٤٠ درصد در انتشار دی‌اکسید کربن مشارکت داشته‌اند. همچنین، مشخص شده است برای انتشارات گلخانه‌ای مربوط به ساختمان‌ها، ٤٠ تا ۹۵ درصد از این انتشارات ناشی از مصرف انرژی عملیاتی است و مابقی ناشی از فرایندهای ساخت‌وساز و تخریب است. با وجود این، ساختمان‌ها بیشترین پتانسیل را در کشورهای در حال توسعه برای دست‌یابی به کاهش جالب توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه می‌دهند. افزون بر این، مصرف انرژی در ساختمان‌ها را می‌توان با فناوری‌های اثبات‌شده و تجاری در دسترس حدود ۳۰ تا ۸۰ درصد کاهش داد (Morsi et al., 2020).

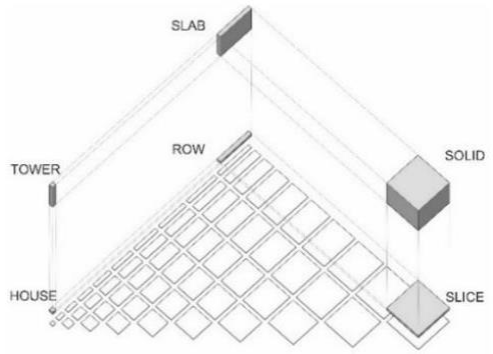
ساختمان‌ها پتانسیل زیادی برای بهینه‌سازی انرژی دارند، اما قوانین و مقرراتی خاص وجود دارند که برای رسیدن به این هدف باید رعایت شوند. برای دست‌یابی به بهره‌وری انرژی، باید راه‌حل‌های طراحی مناسب مربوط به عللی ایجاد شوند که بر عملکرد انرژی ساختمان تأثیر می‌گذارند. آب‌وهوا، فرم معماری، مصالح ساختمانی و محوطه، کارایی کلی تجهیزات، اشغال ساختمان و الگوهای رفتاری ساکنان، برخی از عناصری هستند که باید در نظر گرفته شوند. فناوری‌های مدرن بهینه‌سازی انرژی تا حدی زیاد بر بهبود عملکرد پوشش ساختمان، سیستم‌های روشنایی کارآمد، حفاظت از آب، سازگاری با منابع تجدیدپذیر، سیستم‌های کنترل هوشمند، گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع و غیره متمرکز هستند. ترکیبی از طراحی عالی معماری و سیستم انرژی، و همچنین عملیات کارآمد و نگهداری پس از اشغال، میزان انرژی مصرفی را تعیین می‌کند. بسیاری از کشورها سیاست‌ها و استانداردهای صرفه‌جویی در مصرف انرژی را اجرا کرده‌اند و صرفه‌جویی انرژی در طراحی معماری عاملی مهم است (Sun et al., 2021). بر این اساس، هدف پژوهش حاضر تحلیل سیستماتیک راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در محیط‌های شهری به عنوان چارچوبی برای مدیریت توسعهٔ شهر اصفهان است.

مبانی نظری پژوهش

طبقه‌بندی گونه‌شناختی پیکربندی‌های ساختمان‌های مسکونی به طرزی فزاینده برای حل مسائل پیچیدهٔ مرتبط با مسکن، به ویژه در شرایط فعلی در مناطق شهری ضروری است. راجر شروود[i] با پیروی از ملاحظات نظری نظریه‌پردازان برجسته از جمله کواترمر دو کوئینسی[ii]، جولیو کارلو آرگان[iii] و آلدو روسی[iv]، در تبیین ضرورت تیپولوژی در معماری، نقش گونه‌شناسی فرم‌ها را در مسیر روشن‌شدن مسائل معماری و تعریف راه‌حل‌ها برجسته می‌کند. همان‌طور که شروود مزایای استفاده از نمونه‌های اولیه در مسکن را تبیین می‌کند، انواع واحدهای مسکونی را با توجه به جهت‌گیری آنها و انواع ساختمان‌های مسکونی را با توجه به دسترسی به واحدهای مسکونی تعریف می‌کند (Sherwood, 2017). گروهی از پژوهشگران دانشکدهٔ معماری دانشگاه صنعتی دلفت[v] متشکل از دفتر معماران آتی[vi] با الهام از این آثار و با ظهور اشکال جدید ساختمان‌های مسکونی، با توجه به مشکلات رشد شهری به هزینهٔ منابع طبیعی دفتر معماران به سرپرستی بارت ریزر[vii] و پروفسور رودی اوینتهاک[viii]، مطالعه‌ای را طی سال‌های ۲۰۰٤ تا ۲۰۰۷ با

عنوان چگالی و کیفیت فضایی انجام دادند (NEXT Architects, 2008). هدف از این مطالعه کسب دانش جدید در زمینهٔ تراکم فضایی و یافتن راه‌های بهتر برای بهره‌برداری از مناطق شهری موجود با اجرای تراکم بیشتر با افزایش کیفیت مسکن بود. این مطالعه برای بازسازی بافت شهری از قبل توسعه‌یافته از اهمیتی ویژه برخوردار است. برجسته‌ترین جنبهٔ مطالعه اطمینان از نور روز و جریان هوای کافی، همراه با دسترسی، دید و حریم خصوصی برای واحدهای مسکونی در یک فضای عمومی با کیفیت (نیمه) خصوصی بود. نتیجهٔ این پژوهش که در دانشگاه صنعتی دلفت انجام شد، ایجاد کتابخانهٔ بلوک‌ها[ix] – گونه‌شناسی اشکال ساختمان‌های مسکونی – بود که راه‌حل‌یابی را در ساخت‌وسازهای انجام‌شده در مناطق شهری تسهیل می‌کند. شالودهٔ این راه‌حل یک ماتریس سه‌بُعدی است که در آن، حجم‌های ساختمان نسبت به یکدیگر چیده شده‌اند و به ترتیب از کوچک‌ترین واحد به ارتفاع ۵×۵ متر، ۳ متر یا ۵ متر شروع و به صورت تدریجی ۵×۵ متر بزرگ می‌شود و به بزرگ‌ترین حجم ۵۰×۵۰×۵۰ متر می‌رسد. هنگامی که این حجم‌ها در یک ماتریس سه‌بُعدی شفاف چیده شوند، اشکال آشنا به‌راحتی قابل تشخیص هستند (شکل ۱) (Todorovic, 2016).

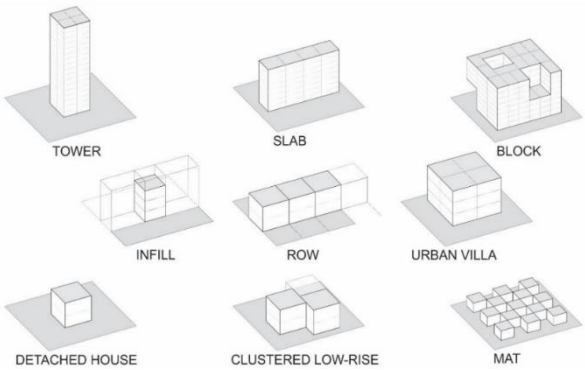
در طراحی معماری ساختمان، در مرحلهٔ اول، احجام اولیه (توده‌های خام) هستند که این حجم‌های اساسی هنوز یک ساختمان را تشکیل نمی‌دهند. در مرحلهٔ دوم، شکل‌دهی با نور و فضا (برش و حفره) انجام می‌شود، حجم پایه بریده و سوراخ می‌شود تا نور روز کافی برای واحدهای مسکونی منفرد فراهم شود. سوراخ‌ها نسبت به اندازه و فرم حجم اصلی متفاوت هستند و هدف اصلی این مرحله تأمین «نور روز کافی» برای واحدهای مسکونی درون این احجام است. این کار فقط با پنجره‌های معمولی انجام نمی‌شود، بلکه با ایجاد حفره‌های معماری در مقیاس بزرگ صورت می‌گیرد که هم نور را عمیقاً به داخل هدایت می‌کنند و هم کیفیت فضایی منحصربه‌فرد خلق می‌کنند. مرحلهٔ سوم تعریف دسترسی (گردش و ارتباط) است که دسترسی به واحدهای مسکونی به صورت ذاتی و جداگانه برای هر حجم تعریف می‌شود؛ یعنی هر حجم یا بلوک ورودی و راه پله/آسانسور مستقل خود را دارد (Reuser & Uytenhaak, 2006). هنگام آزمایش این تیپولوژی، نویسندگان مقایسه‌ای بین چندین ساختمان ساخته‌شده در سال ۲۰۰۶ انجام دادند و از جمله به این نتیجه رسیدند که برخی از انواع جدید ساختمان‌های مسکونی در عمل ظاهر شده‌اند که فراتر از چارچوب استاندارد معماران و شهرسازان هستند. نمونه‌هایی از این انواع جدید عبارت‌اند از: سوپربلوک در جزیرهٔ جاوا در آمستردام[x]، انواع پاسیو در جزیرهٔ بورنئو[xi] در آمستردام، بلوک با پاسیو–بالا[xii] در آمستردام و برج عظیم در مولرپیه[xiii] در روتردام (Todorovic, 2016).



شکل ۱– عناصر اساسی کتابخانهٔ بلوک‌ها بر روی سطح ماتریس افقی (Todorovic, 2016)

برنارد لوپن[xiv] و هارالد مویج[xv]، استادان و پژوهشگران دانشکدهٔ معماری دانشگاه فناوری دلفت[xvi]، با بررسی یک رویکرد جامع به مشکل مسکن، تبیین کرده‌اند چگونه پیوندها و انباشته‌های مختلف واحدهای مسکونی پیکربندی یک حجم مشترک را ایجاد می‌کنند که یک ساختمان مسکونی را تشکیل می‌دهد. لوپن و مویج با مطالعهٔ پیکربندی ساختمان‌های مسکونی، تیپولوژی را مطرح کرده‌اند که شامل ۹ دسته از پیکربندی ساختمان‌های مسکونی است: ۱) خانهٔ مستقل؛ ۲) مات[xvii]؛ ۳) دال؛ ٤) کم‌تراکم خوشه‌ای؛ ۵) ویلای شهری؛ ٦) بلوک؛ ۷) ردیفی؛ ۸) میان‌افزا و ۹) برج. این تیپولوژی پیکربندی ساختمان‌های مسکونی تبیین‌کنندهٔ آن است که چگونه پیکربندی‌های پیوند گسترده ساده‌ترین نوع خانه‌های مجزا، اشکال خطی و ساده را به صورت افقی در سطح زمین ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، افزودن ترکیبات عمودی، اشکال خطی، ساده و بلوکی از یک واحد مسکونی روی هم را ایجاد می‌کند. فرم و بُعد پیکربندی ساختمان مسکونی عملاً با جنبه‌های زمینه‌ای و زیبایی‌شناختی تعیین می‌شود و در هر فرم، واحدهای مسکونی به مناسب‌ترین روش شکل می‌گیرند. به منظور ساده‌سازی فرایند طبقه‌بندی تیپولوژی، لوپن و مویج همچنین فرم‌های انتزاعی از دسته‌های ساختمان‌های مسکونی را تعریف کردند که به عنوان نماد در ایجاد پایگاه مسکن (پایگاه دادهٔ واحدهای مسکونی) در دانشکدهٔ معماری دانشگاه فناوری دلفت و برای اهداف انتشار ادبیات حرفه‌ای در حوزهٔ ساختمان استفاده می‌شوند. این آیکون‌های انتزاعی کاربرد عملیاتی زیادی دارند، زیرا به روشی بسیار ساده

تیپولوژی ساختمان را با توجه به پیکربندی تعریف می‌کنند و بینشی کارآمد را نسبت به ویژگی‌های اساسی ساختمان مورد مطالعه ارائه می‌دهند (Leupen & Mooij, 2008). جاسپر ون زوول [xviii] در تحلیل پیکربندی ساختمان‌های مسکونی جدید و کلاسیک، از همان نمادهای انتزاعی استفاده و ۹ گروه را شناسایی کرده است که عبارت‌اند از: ۱) بلوک‌های بسته؛ ۲) بلوک‌های سوراخ‌دار؛ ۳) زمین‌خراش‌ها و مات‌ها؛ ٤) دال‌ها و دیوارها؛ ٥) مجتمع‌ها؛ ٦) ویلاهای شهری؛ ۷) برج‌ها؛ ۸) بلوک‌های پلکانی و ۹) بلوک‌های بخش مجتمع. این تیپولوژی بر اساس تنوع بیشتر یک بلوک است. برای مثال، چهار نمونهٔ سوپربلوک، پاسیو، بلوک با پاسیو–بالا و برج عظیم به عنوان چهار نوع جدید پیکربندی ساختمان محسوب می‌شوند که در آنها از نمادهای انتزاعی یکسان برای انواع مختلف بلوک استفاده شده است (شکل ۲). برای ساختمان‌های متعلق به گروه‌های مختلف، وابستگی گروه بر اساس ارتباط بیشتر تعیین شد (van Zwol, 2009).



شکل ۲- نمادهای انتزاعی پیکربندی ساختمان‌های مسکونی بر اساس نمادهای تعریف‌شده توسط لوپن و مویج به ترتیبی که تقریباً با موقعیت حجم اصلی کتابخانهٔ بلوک‌های ماتریسی در شکل ۱ مطابقت دارد (Leupen & Mooij, 2008)

از دیدگاه کاربر، بسیاری از عوامل توانایی محیطی، خوانایی و تصویرپذیری، مانند فضای ساختاریافته و نوع‌شناسی ساختمان، و همچنین تعامل صمیمی بین فضای داخل و خارج، برای تفسیر چیدمان ساختمان مورد نیاز هستند. طراحی ساختمان فرایندی پیچیده است که در آن، تصمیم‌های حیاتی دربارهٔ سیستم‌های مختلف ساختمان در مراحل اولیه گرفته می‌شوند (Du et al., 2020). هرگونه استفاده از ساختمان با ترکیبی از طراحی معماری، از جمله هندسه و مصالح، می‌تواند تأثیری جالب توجه بر رفتار محیطی آن داشته باشد (Forcael et al., 2019). با توجه به جابه‌جایی دیوارهای داخلی و خارجی، مرز چیدمان نیز می‌تواند یکی از متغیرهای طراحی چیدمان فضا با مرز غیرمتحرک باشد. تغییر متغیرهای چیدمان فضا کاهش مصرف سالانهٔ انرژی نهایی را ثابت کرده است (Du et al., 2019). همچنین، ثابت شده است بیشتر فضای غیرضروری موجود در ساختمان‌ها ناشی از دسترسی عمومی و اتاق‌های انتظار بزرگ و همچنین طراحی نادرست راهرو، معابر غیرضروری، فضاهای بزرگ و افزایش مناطق خدماتی مانند سرویس‌های بهداشتی، دفترها، مناطق خدماتی، ارتفاع غیرقابل قبول، مکان و شکل برای یک ساختمان می‌تواند به استفادهٔ نامناسب از فضا و در نتیجه هدررفتن فضا و مصرف انرژی و مواد افزوده منجر شود (Coakley et al., 2014). چیدمان فضایی با انرژی کارآمد شامل تغییرات حجمی مؤثر در فضاها همراه با موقعیت راهبردی پنجره‌ها و استفاده از عناصری مانند سایهٔ پنجره‌ها و حیاط‌های سایه‌دار برای کاهش تابش مستقیم خورشید و همچنین کاهش مصرف انرژی مکانیکی است. طراحی چیدمان سنجیده از مصرف انرژی غیرضروری برای افزایش پایداری کلی ساختمان و کمک به کاهش تغییرات آب‌وهوایی جلوگیری می‌کند. برنامه‌ریزی زیرساختی مناسب یک عنصر کلیدی در برآوردن الزامات بهره‌وری انرژی است. چیدمان ساختمان بهینه یا طراحی ساختمان کارآمد مصرف انرژی را به دلیل سیستم‌های گرمایش و تهویهٔ مطبوع کاهش می‌دهد (García-Sanz-Calcedo, 2014).

روش پژوهش

هدف این ارزیابی سیستماتیک سنجش ادبیات جدید دربارهٔ راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در محیط‌های شهری به عنوان چارچوبی برای مدیریت توسعهٔ شهر اصفهان به کمک شناسایی و سنتز مطالعات جدید قابل‌دسترس در این حوزهٔ خاص است. روش این ارزیابی سیستماتیک از رویکرد ارزیابی ادبیات نظریهٔ زمینه‌ای ولفسوینکل [xix] و همکاران (۲۰۱۳) تبعیت می‌کند. از دیدگاه آن‌ها، مراحل تکرارشوندهٔ ارزیابی سیستماتیک عبارت‌اند از: تعریف، جست‌وجو، انتخاب، تحلیل و سنتز که در ادامه به بررسی هریک از آن‌ها پرداخته می‌شود.

تعریف

گام اول ارزیابی که مشخص‌کردن حوزهٔ ارزیابی است، قبل از جست‌وجوی واقعی انجام شده است که بر اساس بحث‌های تکراری میان مؤلفان در طول جست‌وجوی مطالعات دوباره تنظیم و قاعده‌مند شده است. تعریف شامل شناسایی پایگاه داده‌های مرتبط،

تعیین خطوط کلی متناسب، تصمیم‌گیری دربارهٔ اصطلاحات خاص جست‌وجو و بررسی هرگونه پایگاه داده‌ای مرتبط است. بر اساس جست‌وجوهای اکتشافی اولیه، پایان‌نامه‌ها، مقاله‌ها و کتاب‌های لاتین به عنوان موارد خاص جست‌وجو انتخاب شده‌اند. انتخاب اصلاحات خاص جست‌وجو بر اساس کلیدواژه‌هایی مانند مورفولوژی ساختمان‌های مسکونی[xx]، معماری همساز با اقلیم[xxi]، عملکرد انرژی ساختمان‌ها[xxii]، ذخیرهٔ انرژی در ساختمان‌ها[xxiii]، بهینه‌سازی ذخیرهٔ انرژی[xxiv]، کارآمدی انرژی ساختمان‌ها[xxv]، طراحی ساختمان‌های مسکونی با انرژی کارآمد[xxvi]، مورفولوژی و عملکرد انرژی[xxvii]، معماری پایدار در رویکرد با کارآمدی انرژی[xxviii] است.

جست‌وجو

فرایند جست‌وجو در آبان‌ماه ۱۴۰۲ به مدت ۳۰ روز انجام شد. در این فرایند، جست‌وجوی پایان‌نامه‌ها، کتاب‌ها و مقاله‌های مرتبط با راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در محیط‌های شهری به عنوان چارچوبی برای مدیریت توسعهٔ اصفهان انجام شد که در بازهٔ زمانی ۲۰۱۱–۲۰۲۳ منتشر شده‌اند. فهرست رفرنس‌های منابع معتبر به عنوان بخشی از جست‌وجوی تفصیلی برای ادبیات اضافی بر مبنای جست‌وجوی گلوله‌برفی و جست‌وجوی دستی پایش شده است. همهٔ رفرنس‌ها و اطلاعات دربارهٔ عنوان، مؤلفان، خطوط کلی، چکیده و کلمات کلیدی، به نرم‌افزار Endnote ورژن X7.4 انتقال یافتند و نتایج تکراری حذف شدند.

انتخاب

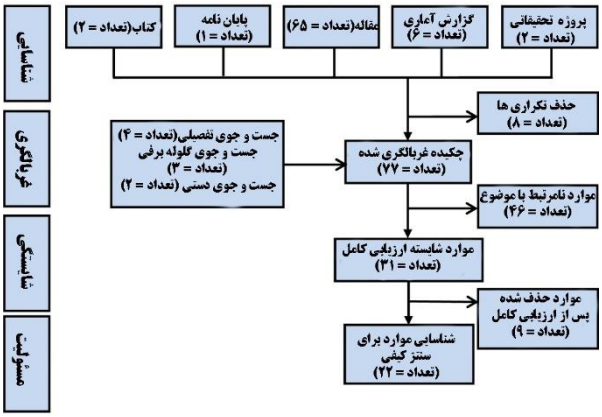
مؤلفان هر یک از عنوان‌ها، چکیده‌ها و واژگان کلیدی همهٔ موارد دانلودشده را دو بار پایش کردند تا به توافق و اجماع‌نظر دست یابند. مطالعات واجد شرایط به راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در محیط‌های شهری به عنوان چارچوبی برای مدیریت توسعهٔ اصفهان اطلاق شد. متن کامل موارد دانلودشده که برای بررسی بیشتر و دقیق‌تر واجد شرایط تشخیص داده شدند، بار دیگر به‌دقت مطالعه شدند. زمانی که دانلود مقاله‌ها و موارد واجد شرایط از سایت‌های الکترونیکی امکان‌پذیر نبود، از نویسندگان اصیل درخواست و به تعداد مقاله‌ها اضافه شد. افزون بر این، پروتکل جست‌وجو در چهار مرحله مشخص شده است: شناسایی، غربالگری، شایستگی و شمولیت. در مرحلهٔ شناسایی، پایگاه‌های مدنظر برای جست‌وجو و کلمات کلیدی آن انتخاب شدند. در مرحلهٔ غربالگری، با استفاده از معیارهای ورود و خروج، پژوهش‌های انتخاب‌شده بررسی و مجدداً انتخاب شدند. به منظور جست‌وجوی دقیق‌تر، معیارهای ورود و خروج تدوین شدند که عبارت‌اند از: مقاله‌ها و رساله‌های دکتری. گزارش‌ها، روزنامه‌ها، کتاب‌ها و پایان‌نامه‌های کارشناسی و کارشناسی‌ارشد از دایرهٔ جست‌وجو حذف شدند، زیرا مقاله‌ها شده‌اند و از اعتبار بیشتری برخوردار هستند. مجله‌های مرتبط با حوزهٔ معماری و ساختمان، انرژی، علوم محیطی، مهندسی و فناوری ساختمان انتخاب و بقیه حذف شدند. بازهٔ زمانی برای انتخاب منابع از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۳ انتخاب شد و موارد مرتبط با سال‌های قبل از ۲۰۱۱ حذف شدند. زبان پژوهش انگلیسی در نظر گرفته شد و سایر زبان‌ها از فرایند جست‌وجو کنار گذاشته شدند. در مرحلهٔ غربالگری، پژوهش‌هایی که تمامی معیارهای ورود را داشتند، مورد پذیرش نهایی قرار گرفتند. در این مرحله، عنوان و چکیدهٔ مقاله‌ها مرور شد. مرحلهٔ شایستگی معطوف به منابعی است که معیارهای ورود را دارا بودند. در مرحلهٔ شمولیت و گنجاندن، پژوهش‌های انتخاب‌شده توسط پژوهشگران به طور عمیق مطالعه شدند.

تحلیل

متن کامل مقاله‌های بازیابی‌شده به شکلی مساوی میان ارزیابان تقسیم شد که به طور متوالی مقاله‌های تعیین‌شده را مستقل تحلیل کردند. این کار به صورت فرایند کدبندی باز، دیدگاه یا مفاهیمی که فرض می‌شد با حوزهٔ ارزیابی و اهداف پژوهش مرتبط است، انجام شد.

سنتز و یافته‌ها

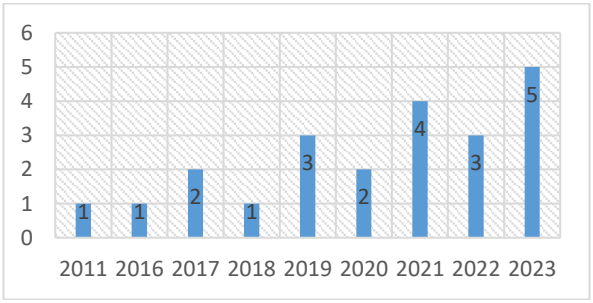
نویسندگان بر اساس ادغام و پایش مفاهیم و مضمون‌ها، راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در محیط‌های شهری را به عنوان چارچوبی برای مدیریت توسعهٔ اصفهان مشخص خواهند کرد. جست‌وجوی اولیه بر اساس عنوان‌ها و چکیده‌ها منتهی به شناسایی ۷۶ منبع شد. بر مبنای موضوع پژوهش، ۳۱ مورد شایستگی ارزیابی کامل تشخیص داده شدند و در نهایت، ۲۲ مورد از آنها برای تحلیل نهایی مدنظر قرار گرفتند. جست‌وجوی نهایی به طیفی گسترده از منابع اسنادی شامل کتاب، مقاله، تز، گزارش آماری و پژوهشی انجامید. متون انتخابی به‌وضوح انعکاس‌دهندهٔ تحلیل سیستماتیک راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در محیط‌های شهری به عنوان چارچوبی برای مدیریت توسعه هستند (شکل ۳). بر این اساس، در ادامه، مشخصات منابع انتخابی بیان خواهد شد و اطلاعات مرتبط با آنها ارائه خواهد شد.



شکل ۳- نمودار مراحل ارزیابی سیستماتیک ادبیات پژوهش (منبع: نگارندگان پژوهش)

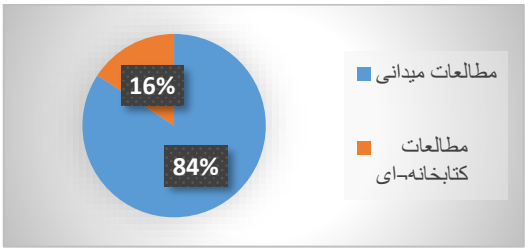
تجزیه‌وتحلیل یافته‌ها

بازهٔ زمانی منابع انتخاب‌شده برای تحلیل نهایی از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۳ است. بیشترین فراوانی منابع مربوط به سال ۲۰۲۳ (پنج منبع) و کمترین فراوانی مربوط به سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ است (هر کدام یک منبع). شکل (٤) فراوانی منابع را نشان داده است. تحلیل زمانی داده‌های پژوهش بیانگر آن است که حدود ۲٤ درصد از منابع مربوط به سال ۲۰۲۳ است. پس از آن، سال ۲۰۲۱ بیشترین منابع را به خود اختصاص داده است که معادل ۱۸ درصد از کل منابع است. سپس، سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۲ قرار دارند که هر کدام ۱٤ درصد از منابع را به خود اختصاص داده‌اند(در مجموع، ۲۸ درصد از منابع). همچنین، سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ نیز هر کدام ۹ درصد از منابع را به خود اختصاص داده‌اند (در مجموع، ۱۸ درصد از منابع). سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۱٦ و ۲۰۱۸ نیز در مجموع ۱۲ درصد از کل منابع پژوهش را به خود اختصاص داده‌اند.



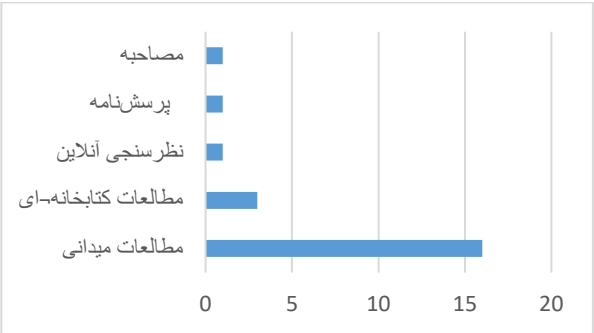
شکل ٤- تحلیل زمانی منابع پژوهش (منبع: یافته‌های پژوهش)

از لحاظ نوع پژوهش، بیشترین فراوانی مقاله‌ها به صورت کمّی است؛ چنانچه رویکرد ۱۸ منبع معادل ۸۲ درصد از منابع به صورت کمّی بوده است. افزون بر این، رویکرد چهار منبع معادل ۱۸ درصد از کل منابع به صورت کیفی بوده است (شکل ٥).



شکل ٥- نوع منابع پژوهش (منبع: یافته‌های پژوهش)

روش جمع‌آوری داده‌ها به صورت مطالعات میدانی، مطالعات کتابخانه‌ای، نظرسنجی آنلاین، مصاحبه و پرسشنامه بوده است. بیشترین روش جمع‌آوری داده‌ها به صورت میدانی معادل ۷٤ درصد از داده‌ها بوده است. پس از آن، مطالعات کتابخانه‌ای با ۱٤ درصد قرار دارد و در نهایت نیز نظرسنجی آنلاین، مصاحبه و پرسشنامه قرار دارند که سهم هر کدام معادل ٤ درصد بوده است (شکل ٦).



شکل ٦- جمع‌آوری داده‌های پژوهش (منبع: یافته‌های پژوهش)

بیشترین فراوانی مقاله‌ها در مجلهٔ ساختمان به چاپ رسیده است که حدود ۱٤ درصد از کل منابع پژوهش را به خود اختصاص داده است. پس از آن، مجله‌های انرژی و ساختمان و انرژی، هر کدام ۹ درصد از منابع را به خود اختصاص داده‌اند. مقاله‌های انتخاب‌شده در ۱۸ مجله به چاپ رسیده‌اند که عبارت‌اند از: ساختمان‌ها؛ انرژی؛ انرژی و ساختمان؛ مجلهٔ معماری آسیایی و مهندسی ساختمان؛ مجلهٔ مهندسی بوم‌شناسی؛ مواد امروز؛ انرژی و محیط ساخت؛ مجلهٔ فیزیک؛ مجلهٔ بین‌المللی فناوری‌های کم‌کربن؛ محیط؛ پایداری انرژی مدیریت شهری؛ زمین و علوم محیطی؛ علم و مهندسی مواد؛ مجلهٔ روشنایی روز؛ مجلهٔ بین‌المللی ژئومیت؛ مجلهٔ مهندسی معماری؛ علوم محیطی و در نهایت مهندسی (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات منابع پژوهش

نویسنده	مجله	محدوده	جمع‌آوری داده‌ها	نوع پژوهش	روش
(Lamrani et al., 2023)	Buildings	شهرهای مراکش	مطالعات میدانی	کمّی	مدل‌سازی (نرم‌افزار TRNSYS)
(Hilal et al, 2023)	Buildings	ابوظبی، امارات متحدهٔ عربی	نظرسنجی آنلاین	کمّی	مدل‌سازی (نرم‌افزار شبیه‌سازی انرژی پلاس)
(Ren et al, 2023)	Journal of Asian Architecture and Building Engineering	منطقهٔ گرمسیری تبت، چین	پرسشنامهٔ ساکنان	کمّی	مدل‌سازی (نرم‌افزار شبیه‌سازی مصرف انرژی)
(Omar Baneaez & Akkoyunlu, 2023)	Journal of Ecological Engineering	منطقهٔ قونیه‌مرام، ترکیه	مطالعات میدانی	کمّی	شبیه‌سازی (نرم‌افزارهای Revit ،Ecotect ،Hap)
(Hromádka et al, 2023)	Buildings	شهر برنو، جمهوری چک	مطالعات میدانی	کمّی	مطالعهٔ موردی
(Renuka et al, 2022)	Materials Today Proceedings,	بمبئی، شیلونگ، دهلی، چنای	مطالعات میدانی	کمّی	روش تحلیل انرژی (BEopt)
(Ochedi & Taki, 2022)	Energy and Built Environment	لوکوجا، نیجریه	مصاحبه‌های ساختاریافته و نیمه‌ساختاریافته	کیفی	تحلیل محتوا
(Wang & Hu, 2022)	Journal of Physics: Conference Series	-	مطالعات میدانی	کمّی	مدل ارزیابی شبکهٔ بیزی
(Gökçe & Gökçe, 2021)	International Journal of Low-Carbon Technologies	ایالت نیدرزاکسن (آلمان)	مطالعات میدانی	کمّی	مدل‌سازی (ادیتورز)
(Abdou et al, 2021)	Environment	طنجه، مراکش	مطالعات میدانی	کمّی	مدل‌سازی
(Loghman, 2021)	Urban Manage Energy Sustainability	-	مطالعات کتابخانه‌ای	کیفی	تحیل محتوا
(Tadeu et al, 2021)	Energy and Buildings	براگانسا، پرتغال سویل، اسپانیا	مطالعات میدانی	کمّی	شبیه‌سازی
(Ciardiello et al, 2020)	Energy	آب‌وهوای مدیترانه	مطالعات میدانی	کمّی	بهینه‌سازی چندهدفهٔ پیشنهادی، مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و با استفاده از نرم‌افزار دسترسی باز
(Deng et al, 2020)	Earth and Environmental Science	شهرهای چین	مطالعات میدانی	کمّی	شبیه‌سازی (نرم‌افزار Design Builder)
(Reuter & Reiter, 2019)	Materials Science and Engineering	-	مطالعات کتابخانه‌ای	کیفی	تحلیل چندمعیاره
(Nadhim Majeed et al, 2019)	Journal of Daylighting	شهر اربیل، عراق	مطالعات میدانی	کمّی	شبیه‌سازی (Revit)
(Lapisa, 2019)	International Journal of GEOMATE	-	مطالعات میدانی	کمّی	شبیه‌سازی عددی
(Gou et al, 2018)	Energy and Buildings	شانگهای چین	مطالعات میدانی	کمّی	مدل بهینه‌سازی چندهدفه، تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط آن همراه با شبکهٔ عصبی مصنوعی
(Khamma & Boubekri, 2017)	Journal Engineers Architecture	شیکاگو، ایالات متحدهٔ آمریکا	مطالعات میدانی	کمّی	شبیه‌سازی‌های عددی
(Touloupaki & Theodosiou, 2017)	Procedia Environmental Sciences	-	مطالعات کتابخانه‌ای	کیفی	الگوریتم‌های تکاملی و شبیه‌سازی انرژی از طریق Grasshopper
(Zhang et al, 2016)	Energy	شهرهای چین	مطالعات میدانی	کمّی	مدل‌سازی-شبیه‌سازی-بهینه-سازی (الگوریتم ژنتیک چندهدفه)
(Faizi et al, 2011)	Procedia Engineering	مجتمع‌های مسکن مهر استان تهران	مطالعات میدانی	کمّی	مدل‌سازی (نرم‌افزار Ecotect)

در مجموع، ۱۷ مؤلفه در خصوص راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در محیط‌های شهری به عنوان چارچوبی برای مدیریت توسعهٔ اصفهان استخراج شده‌اند که عبارت‌اند از: نمای دوپوسته؛ جهت‌گیری ساختمان؛ فرم ساختمان؛ بهینه‌سازی ضخامت

عایق دیوار؛ بهینه‌سازی نسبت دیوار به پنجره؛ بهینه‌سازی ضخامت پنجره؛ حسگر شبکهٔ بی‌سیم؛ ارتفاع دیوار؛ وجود ساختمان مجاور؛ مصالح بام؛ آسایش حرارتی؛ سرمایش و گرمایش غیرفعال؛ برنامه‌ریزی مبتنی بر انرژی برای یک سایت؛ منابع انرژی جایگزین؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ نور و سایبان (جدول ۲).

جدول ۲- مؤلفه‌های تأثیر گذار بر کارایی انرژی در ساختمان‌های مسکونی

مؤلفه	تعریف
نمای دوپوسته	نمای دوپوسته با حفرهٔ ۳۵سانتی‌متری شامل یک لایهٔ تک‌پوستهٔ دوجداره در داخل و یک پوستهٔ دوجداره است. لایه، به عنوان یک لایهٔ بیرونی، می‌تواند مصرف انرژی کلی تهویهٔ مطبوع را تا بیش از ۲۵ درصد کاهش دهد؛ از این رو، اجرای نمای دوپوسته راه‌حلی برای مقابله با چالش‌های انرژی منحصربه‌فرد در ساختمان‌های مسکونی مرتفع در آب‌وهوای گرم و خشک ارائه می‌دهد.
جهت‌گیری ساختمان و مورفولوژی	مورفولوژی ساختمان تأثیری جالب توجه بر مصرف انرژی دارد و طرح‌هایی که به‌درستی مسائل آب‌وهوایی را در نظر می‌گیرند، بهبود عملکرد انرژی دارند. بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها در مرحلهٔ طراحی می‌تواند نقشی به‌سزا در بهبود بهره‌وری انرژی آن ساختمان‌ها داشته باشد. جهت و مورفولوژی ساختمان عواملی مهم هستند که بر افزایش یا از دست دادن گرمای سازهٔ ساختمان تأثیر می‌گذارند. بهینه‌سازی جهت و شکل ساختمان ۳۶ درصد در مصرف انرژی ساختمان صرفه‌جویی می‌کند؛ از این رو، لازم است جهت‌گیری و شکل ساختمان و عوامل جغرافیایی و هواشناسی را کمّی‌سازی کرد. در طراحی جهت‌گیری ساختمان، مقدار آزیموت محور بلند پایین‌تر برای بهبود آسایش حرارتی داخلی و عملکرد صرفه‌جویی در مصرف انرژی ساختمان مفید است. افزون بر این، شکل فشردهٔ ساختمان و جهت‌گیری مناسب ساختمان می‌تواند مصرف انرژی برای سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی را بسته به شرایط جغرافیایی محل قرارگیری ساختمان تا ۸۱ درصد کاهش دهد.
فرم ساختمان	در مقایسه با ساختمان‌های مکعبی‌شکل، کل افزایش تابش خورشیدی ساختمان‌های آزاد بهینه‌شده ۳۰ تا ۵۳ درصد افزایش یافته است. فرم ساختمان تأثیر زیادی بر مصرف انرژی آن به ویژه در ساختمان‌های اداری به دلیل لعاب‌های بسیار زیاد آنها دارد. طراحی با توجه به مسائل آب‌وهوایی به افزایش عملکرد انرژی منجر می‌شود. این امر در ساختمان‌های مستطیلی، T، L و U صدق می‌کند. نوع تخته‌ای در بیشتر مناطق آب‌وهوایی نسبتاً صرفه‌جویی در مصرف انرژی دارد، در حالی که نوع بلوک و نوع شانه‌ای‌شکل برای تابستان گرم و منطقهٔ گرم زمستان مناسب‌تر هستند.
بهینه‌سازی ضخامت عایق دیوار	پنجره‌ها با راندمان زیاد و عایق‌بودن دیوارها از دریافت و هدررفتن حرارت جلوگیری می‌کنند. کاهش چنین انتقال حرارتی باعث کاهش میزان شارژ گرمایشی و سرمایشی ساختمان و در نتیجه، کاهش مصرف انرژی می‌شود. هزینهٔ گرمایش و سرمایش کمتر به سیستم‌های تهویهٔ کوچک‌تر نیاز دارد. افزون بر این، هزینه‌های صرف‌شده برای این سیستم‌ها کاهش می‌یابند. این مزیت‌های ملموس و عینی، پنجره‌های بسیار کارآمد و دیوارهای عایق‌شده در عمل شرایط گرمایش مناسب‌تری را فراهم می‌کنند. به دلیل ویژگی‌های مواد عایق، درجهٔ گرمایش پنجره‌ها و دیوارها در زمستان‌ها بیشتر و در تابستان‌ها کمتر است. استفاده از تجهیزات تهویهٔ کوچک‌تر باعث کاهش صدای ماشین‌های مکانیکی و افزایش کیفیت صوتی فضاهای داخلی می‌شود. جایی که ضخامت عایق در محدودهٔ ۱ تا ۱۵ سانتی‌متر با عایق بسیار کم یا بدون عایق در مصالح دیوار استفاده شود، با افزایش عایق، صرفه‌جویی در مصرف انرژی افزایش می‌یابد. این موضوع با کاهش بارهای انرژی مرتبط با گرمایش، سرمایش و مصرف کلی انرژی مشهود است. پس از فراتررفتن از ضخامت عایق از ۱۱ سانتی‌متر، کاهش مصرف انرژی در بار گرمایشی وجود دارد. بار خنک‌کننده پس از تقریباً ۱۱ سانتی‌متر ضخامت عایق در نزدیکی صفر قرار دارد. هنگام بررسی کل صرفه‌جویی انرژی سالانه، صرفه‌جویی در انرژی مربوط به عایق ۱۱سانتی‌متری ۳/۸۹۶ درصد بود که کمتر از صرفه‌جویی در انرژی مشاهده‌شده در شرایط گرمایش مشابه با عایق بیشتر از ۱۱ سانتی‌متر بود. علاوه بر این، مقایسهٔ صرفه‌جویی در انرژی بین سازه‌های عایق‌شده از ۱۵ سانتی‌متر و ساختمان‌های بدون عایق به یک محدودهٔ صرفه‌جویی ۳/۹۲۰ – ۳/۳۹۸ سانتی‌متر می‌شود. در مجموع، ضخامت بهینهٔ عایق بین ۷–۱۱ سانتی‌متر تعیین می‌شود. اجرای ضخامت عایق ۱۱سانتی‌متری به کاهش قابل ملاحظهٔ ٤٦/٧١ درصد در بار گرمایشی و صرفه‌جویی سالانهٔ انرژی ۳/۸۹۶ درصد منجر می‌شود. با وجود این، افزایش بیشتر ضخامت عایق بیش از ۱۱ سانتی‌متر باعث صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در مصرف انرژی نمی‌شود.
بهینه‌سازی نسبت دیوار به پنجره	نسبت بهینهٔ پنجره به دیوار برای مقاصد گرمایشی ۷۵ درصد است که به صرفه‌جویی ٥/٠٤ درصد در انرژی منجر می‌شود. همچنین، نسبت بهینهٔ پنجره به دیوار از نظر بار خنک‌کننده مؤثرترین است که به صرفه‌جویی ۱/۱۳ درصد و کل بار تهویهٔ سالانهٔ ۳/۵۲۲ درصد منجر می‌شود.
بهینه‌سازی ضخامت پنجره	بهینه‌سازی ضخامت پنجره باعث افزایش صرفه‌جویی در گرمایش سالانه از ٠/٦ تا ١/٠٣٤ با ارتقای ضخامت پنجره‌ها در ساختمان از ٤ میلی‌متر به ٦ میلی‌متر و ٨ میلی‌متر می‌شود. از سوی دیگر، افزایش ضخامت پنجره از ٤ میلی‌متر به ٦ میلی‌متر و ٨ میلی‌متر باعث کاهش صرفه‌جویی در سرمایش سالانهٔ ساختمان می‌شود، زیرا به بار سرمایشی کمک می‌کند. نسبت مصرف انرژی برای سرمایش و تهویهٔ مطبوع ساختمان به محدودهٔ ٠/٥٥ تا ١/١٥ افزایش یافته است. افزون بر این، افزایش ضخامت پنجرهٔ ساختمان به افزایش متناسب در صرفه‌جویی انرژی سالانه منجر می‌شود. بیشترین میزان صرفه‌جویی قابل دست‌یابی ١/٨٨ درصد از کل مصرف انرژی سالانه است.
حسگر شبکهٔ بی‌سیم	سیستم بهینه‌سازی انرژی، از طریق بهینه‌سازی سیستم‌های ساختمانی مصرف‌کنندهٔ انرژی، مانند گرمایش، سرمایش، سیستم‌های روشنایی و لوازم خانگی/اداری با پشتیبانی از راه‌حل سیستم یکپارچه، کل مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن ساختمان‌ها را کاهش می‌دهد. این سیستم سطوح بهره‌وری انرژی را بین ٢٩/٣٤ درصد تا ٣٨/١٨ درصد در شرایط مختلف فصلی و اشغال در انواع ساختمان‌های اداری و مسکونی ارائه می‌دهد. سیستم توسعه‌یافته را می‌توان در انواع ساختمان‌های تاریخی و جدید به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش انتشار کربن مستقر کرد.
ارتفاع دیوار	ارتفاع سقف یکی از عوامل کلیدی در کاهش مصرف انرژی است. ارتفاع سقف تأثیری مستقیم بر مصرف انرژی دارد. دمای هوا با ارتفاع و همچنین میانگین سرعت باد افزایش می‌یابد. ساختمان‌های بلندتر بیشتر در معرض این بادهای شدید و همچنین ساعات بیشتری در معرض آفتاب مستقیم قرار دارند. بنابراین، مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش هر دو افزایش می‌یابد؛ از این رو، مصرف انرژی با افزودن ارتفاع سقف افزایش می‌یابد و معماران را قادر می‌سازد تا انرژی کارآمد طراحی کنند و به رویکردهای پایدار نزدیک شوند.
وجود ساختمان مجاور	ساختمان‌های همسایه بر مصرف انرژی یک ساختمان خاص تأثیر می‌گذارند. در صورت عدم وجود ساختمان در مجاورت، نور مستقیم خورشید بر روی دیوارها می‌افتد که مصرف انرژی را افزایش می‌دهد، زیرا انرژی بیشتری برای خنک‌کردن ساختمان مورد نیاز است؛ بنابراین، مصرف انرژی در صورت وجود ساختمان‌های

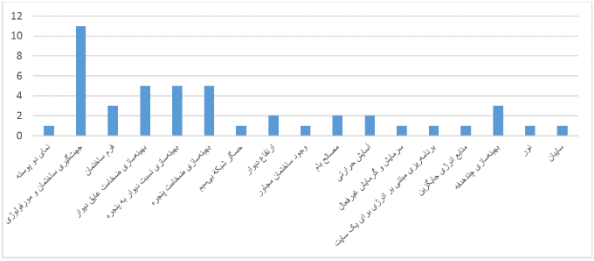
	مجاور کاهش می‌یابد.
مصالح بام	سیستم بام متشکل از انواعی مختلف از مواد است که به منظور ایجاد حفاظت در برابر آب‌وهوا در ساختمان‌ها به هم متصل می‌شوند. بام‌ها علاوه بر ضدآب‌بودن، به محافظت از ساختمان در برابر آفتاب، باران، برف و سایر عناصر کمک می‌کنند؛ از این رو، مصالح بام بر اساس ویژگی‌های آنها انتخاب می‌شود. متداول‌ترین مصالح سقف موجود عبارت‌اند از: آسفالت، چوب، خاک رس، سیمان و تخته‌سنگ، شیشه و پلاستیک و پوشش‌های مایع پلاستیکی.
آسایش حرارتی	ساخت آجر دوتایی در تمام مناطق آب‌وهوایی کارآمدتر است؛ بنابراین، این ماده انرژی مورد نیاز سالانهٔ ساختمان را در مقایسه با ساختمان‌های آجری معمولی بین ۲۲ تا ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. در سردترین روزهای زمستان، سقف ۳۰ درجهٔ جنوبی دمای داخلی را ۲/۵ درجهٔ سانتی‌گراد در مقایسه با سقف افقی افزایش می‌دهد. افزایش دما می‌تواند مصرف انرژی تهویهٔ مطبوع را بین ۷ تا ۳۲ درصد و ساعات سرمایش بیش از حد را ۱۲ تا ۲۱ درصد در شهرهای بالای ۳۰ درجهٔ شمالی کاهش دهد.
سرمایش و گرمایش غیرفعال	تابش تشعشع خورشید به سطح ساختمان بیشترین انرژی ورودی به آن است. تابش خورشید گرما را تأمین می‌کند و در واقع، نور و اشعهٔ ماورای بنفش لازم برای فرایند فتوسنتز را تأمین می‌کند. در طول تاریخ، معماران سعی داشته‌اند از فرم‌هایی استفاده کنند که در تابستان‌ها سایه می‌افکنند و در زمستان گرمایی مناسب دارند. این پیش‌نیاز مهم معمولاً در طراحی ساختمان‌های مدرن نادیده گرفته می‌شود. معماری منفعل منظومهٔ شمسی راه‌حل‌ها و تمهیداتی را در اختیار ما قرار می‌دهد تا بتوان از تابش خورشید در زمان‌هایی مفیدتر از روز استفاده کرد. با ایجاد سایه به کمک سایه‌بان یا گیاهان، می‌توان از دریافت گرما در تابستان و متعاقب آن هزینه‌های تحمیلی برای سرویس تهویه جلوگیری کرد. باد و جریان هوا دو مزیت مهم در میان مسائل عمدهٔ شهرسازی بوده‌اند. برای مثال، ساختار شهرهای رومی اساساً بر اساس جهت باد غالب بود.
برنامه‌ریزی مبتنی بر انرژی برای یک سایت	چنین برنامه‌ریزی طراحان را قادر می‌کند تا بیشترین استفاده از منابع طبیعی موجود در سایت را داشته باشند. در هوای معتدل، ایجاد منافذ در ضلع جنوبی ساختمان گرمایش خورشیدی غیرفعال را افزایش می‌دهد. درختان برگ‌ریز در تابستان‌ها سایه می‌اندازند و در زمستان‌ها دریافت گرمای خورشید را ممکن می‌کنند. با کاشت گیاهان همیشه سبز در ضلع شمالی ساختمان، می‌توان از آن در برابر بادهای زمستانی محافظت کرد و بازده مصرف انرژی آن را بهبود بخشید. برای تأمین شرایط خنک‌کنندهٔ طبیعی در تابستان، ساختمان‌ها را می‌توان در نزدیکی منابع آب در سایت قرار داد.
منابع انرژی جایگزین	سیستم‌های باد، آب، زمین‌گرمایی (گرمای زمین) و انرژی خورشیدی، همگی از نظر بازار در دسترس هستند؛ بنابراین، تقاضا برای منابع انرژی خارجی کاهش یا حذف خواهد شد. تجهیزات الکتریکی یا گرمایشی را می‌توان با این سیستم‌ها یا ترکیبی از این سیستم‌ها در هر شرایط آب‌وهوایی اعمال کرد. پس از هزینه‌های ساخت، عمدهٔ هزینه‌های ساختمان مربوط به نگهداری و استفاده از آن است. در طول عمر یک ساختمان، این هزینه‌ها ممکن است از هزینه‌های ساخت‌وساز بیشتر باشند؛ در نتیجه، انتخاب دقیق سیستم‌های گرمایش و سرمایش و تهویهٔ کم‌مصرف ضروری و الزامی به نظر می‌رسد. قیمت‌ها و هزینه‌های این تجهیزات ممکن است بیشتر از تجهیزات بی‌کیفیت باشند، اما این هزینه‌ها با صرفه‌جویی در آینده جبران می‌شوند. مقدار انرژی مورد نیاز برای انواع مصالح ساختمانی متفاوت است. انرژی ضروری مصالح ساختمانی میزان کل انرژی مصرف‌شده در کل چرخه را نشان می‌دهد. برای مثال، آلومینیوم دارای انرژی ضروری بسیار زیادی است، زیرا برای تولید آن از سنگ معدن بوکسیت به انرژی الکتریکی زیادی نیاز است. با این حال، آلومینیوم بازیافتی به انرژی بسیار کمتری برای بازتولید نیاز دارد. انتخاب مصالح با انرژی ضروری کمتر تأثیر کلی ساختمان بر محیط را در طول عمر آن کاهش می‌دهد. با استفاده از مواد داخلی به‌جای مواد وارداتی مشابه، در انرژی مورد نیاز حمل‌ونقل صرفه‌جویی می‌شود. آب مصرفی در ساختمان را می‌توان به دو گروه فاضلاب یا آب خاکستری یا فاضلاب تقسیم کرد. آب خاکستری آبی است که از فعالیت‌هایی مانند شستن تولید می‌شود؛ اگرچه کیفیت آن به موازات آب آشامیدنی نیست، مانند فاضلاب نیازی به تصفیه ندارد. در واقع، می‌توان آن را دوباره در ساختمان بازیافت کرد و از آن برای مصارفی مانند آبیاری گیاهان تزئینی یا سیفون توالت استفاده کرد. استفاده از سیستم‌های لوله‌کشی خوب و طراحی‌شده می‌تواند آن را تسهیل کند. در بیشتر نقاط جهان، نزولات جوی روی ساختمان‌ها منبعی خوب برای تولید آب نیست. ساختمان‌ها معمولاً به گونه‌ای طراحی می‌شوند که ساکنان خود را از بارندگی محافظت کنند و ایدهٔ استفاده از آب باران ریخته‌شده بر روی ساختمان‌ها به طور گسترده آزمایش نشده است. پوستهٔ بیرونی ساختمان‌ها به ویژه سقف‌ها در صورت ترکیب با مخازن آب می‌تواند برای آبیاری یا سیفون حمام استفاده شود. سیستم و تجهیزات مربوط به تأمین آب در ساختمان‌ها را می‌توان به گونه‌ای انتخاب کرد که میزان مصرف انرژی و اتلاف آن را کاهش دهد. در بسیاری از مناطق، طبق قوانین و مقررات، استفاده از شیرهای آب با شدت کم و مخازن توالت کم‌حجم اجباری است. توالت‌های مکنده و بیوکمپوست می‌توانند مصرف آب را تا حدی زیاد کاهش دهند. توالت‌های بیوکمپوست فاضلاب موجود در آنها را تصفیه می‌کنند و بنابراین، نیاز به روش انرژی‌گیر تصفیهٔ شهری را برطرف می‌کنند. چشم‌اندازسازی طبیعی با استفاده از گیاهان محلی منطقه نیز در کاهش مصرف آب مؤثر است. این‌گونه گیاهان با سطح بارندگی منطقه تنظیم شده‌اند و نیازی به آبیاری اضافی ندارند. در مواردی که آبیاری ضروری است، باید توجه شود که آبپاش‌ها به گونه‌ای تنظیم شوند که آب در پیاده‌روها و خیابان‌ها پاشیده نشود. تولید و مصرف مصالح ساختمانی اثراتی مختلف بر محیط محلی و جهانی دارد. بهره‌برداری، فرآوری، تولید و حمل‌ونقل مصالح ساختمانی همگی آسیب‌های زیست‌محیطی را به همراه دارند. به منظور صرفه‌جویی و کاهش مصرف، باید از روش‌هایی برای کاهش خروجی‌ها و جریان‌ها استفاده کرد. در اینجا، مانند آب، برخی از این روش‌ها هم‌پوشانی دارند. یکی از مستقیم‌ترین و تأثیرگذارترین روش‌های صرفه‌جویی در مصالح استفاده از منابعی است که قبل از ساخت بنا وجود دارد. عمر بیشتر ساختمان‌ها بیشتر از هدفی است که برای آن طراحی شده‌اند. بسیاری از آنها – البته نه همهٔ آنها — می‌توانند با هزینهٔ کمتر برای اهداف دیگر تغییر شکل دهند. بناهایی که راهی جز تخریب ندارند باید به عنوان منبع ساخت بناهای جدید استفاده شوند. بسیاری از مصالح ساختمانی مانند چوب، فولاد و شیشه به‌راحتی بازیافت و به مواد جدید تبدیل می‌شوند. برخی دیگر مانند آجر یا پنجره را می‌توان به طور کامل با همان فرم در ساختمان‌های جدید استفاده کرد. مبلمان و به خصوص سیستم‌های جدید پارتیشن‌بندی رسمی به‌راحتی در شرایط جدید قابل استفاده هستند. در فرایند برنامه‌ریزی برای ساختمان و انتخاب مصالح ساختمانی، باید به دنبال راه‌هایی برای استفاده از مواد قابل بازیافت باشیم. این خاصیت از هدررفتن انرژی مصرف‌شده در فرایند تولید جلوگیری می‌کند. اگر ساختمانی بزرگ‌تر از اندازهٔ لازم برای کاربرد و هدف مدنظر باشد یا اندازهٔ سیستم‌های آن بزرگ‌تر از حد مورد نیاز باشد، مصالح به‌کاررفته نیز بیش از مقدار مناسب خواهد بود. وقتی یک ساختمان در مقایسه با تعداد کسانی که از آن استفاده می‌کنند بسیار بزرگ یا بسیار کوچک باشد، سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه که به طور طبیعی با اندازهٔ ساختمان متناسب هستند ناکافی یا ناکارآمد خواهند بود. این روش ارتباطی مستقیم با مراحل برنامه‌ریزی و طراحی فرایند معماری دارد.

	برای اطمینان از ابعاد و اندازهٔ ساختمان طراحی‌شده و سیستم‌های آن، باید نیازهای فعلی و آتی کارفرمایان بررسی شوند. به معماران توصیه می‌شود تا حد امکان ساختمان‌ها را بر اساس ابعاد استاندارد ساختمان طراحی کنند. مواد اضافی به ضایعات بیشتر برای تطبیق اندازهٔ آنها با فضاهای غیرمدولار منجر می‌شود. محصولاتی مانند لاستیک‌های بازیافتی ماشین‌ها، قوطی‌های نوشیدنی و ضایعات کشاورزی را می‌توان به عنوان منابع غیرعادی در نظر گرفت که به‌راحتی به عنوان مصالح ساختمانی در دسترس هستند. چنین موادی نیاز به میدان‌های دفع زباله را کاهش می‌دهد. همچنین، این مواد در مقایسه با مواد رایج‌تر، انرژی ضروری کمتری دارند. با حرکت ابرها و خورشید در آسمان، نور آن تغییر می‌کند. هر انسانی از یک ساعت درونی برخوردار است که با چرخهٔ روز و شب تنظیم شده است. از نظر روان‌شناسی و فیزیولوژیکی، پنجره‌ها و نورگیرها نقشی مهم در تنظیم ساعت بدن دارند. پنجره‌های قابل تنظیم بسیار حیاتی هستند، زیرا به ساکنان اجازه می‌دهند تا دمای و تهویهٔ مکان خود را تا حدی کنترل کنند. هوای تازه‌ای که از طریق کانال‌های تمیز وارد اتاق ها می‌شود برای سلامت و آسایش ساکنان ساختمان بسیار مهم است. هوای تازه و تمیز نقشی مهم‌تر نسبت به تأمین اکسیژن دارد. گردش داخلی و حرکت بستهٔ هوای داخل ساکنان فضاهای داخلی را در معرض حجمی عظیم از باکتری‌ها و ترکیبات شیمیایی قرار می‌دهد. یکی از جنبه‌های مهم طراحی پایدار توانایی پایدار آن است. ساختمان‌های بادوام که با شرایط هم‌خوانی دارند، پایدارتر از سایرین هستند. بخشی از این سازگاری به پاسخ‌گویی آن نسبت به افراد در سنین مختلف و شرایط فیزیکی متفاوت اشاره دارد. هرچه افراد بیشتری بتوانند از ساختمان استفاده کنند، عمر مؤثر آن بیشتر خواهد بود.
بهینه‌سازی چندهدفه	بهینه‌سازی چندهدفه (پارامترهای طراحی مانند جهت ساختمان، نسبت پنجره به دیوار، عایق حرارتی و نفوذپذیری دیوارها و سقف‌ها)، نقشی مهم در صرفه‌جویی در انرژی و آسایش حرارتی دارد؛ چنانچه به ۲۱ درصد صرفه‌جویی انرژی کمک می‌کند.
نور	نوع‌شناسی نقطه‌ای بهترین نوع پلان در بین همهٔ موارد از نظر ارائهٔ عملکرد بهینه در نور روز است، در حالی که نوع‌شناسی پلان دوبار بارگذاری‌شده[xxi] بدترین نوع پلان است. گونه‌شناسی طرح تأثیری آشکار بر دست‌یابی به عملکرد نور روز در ساختمان‌های مسکونی چند طبقه دارد. پژوهش‌های کنونی می‌توانند به شناسایی کاستی‌های سطح نور روز در ساختمان‌هایی کمک کنند که به دنبال غلبه بر آن در مراحل اولیهٔ طراحی هستند.
سایبان	سایبان شبیه‌سازی‌شده از تخته‌های چوب‌پنبه‌ای عایق[xxx] برای جایگزینی لایه‌های ذخیرهٔ آب و عایق استفاده می‌کند. با توجه به ویژگی‌های حرارتی ذاتی تخته‌های چوب‌پنبه‌ای عایق (لایهٔ تختهٔ چوب‌پنبه‌ای عایق ۰/۲متری موجب می‌شود شار حرارتی (مقدار انرژی حرارتی منتقل‌شده در واحد زمان و بر واحد سطح گفته می‌شود) حدود ۵۸ درصد در مقایسه با لایهٔ تختهٔ چوب‌پنبه‌ای عایق ۰/۰۵متری کاهش یابد). انتظار می‌رود این سایبان‌ها آسایش داخلی را بهبود بخشند و در مصرف انرژی صرفه‌جویی کنند. اگرچه تخته‌های چوب‌پنبهٔ عایق و لایه‌های خاک بیشترین سهم را در عایق حرارتی دارند، ویژگی‌های پوشش گیاهی برای عملکرد کلی بام سبز اهمیتی جالب توجه دارند. شاخص سطح برگ[xxxi] مرتبط‌ترین متغیر پوشش گیاهی است (تغییر از LAI ۲ به LAI ۵ شار گرمای ورودی را حدود ۲۷ درصد کاهش می‌دهد).

(منبع: یافته‌های پژوهش)

ویژگی‌های متنوع هر اقلیم تأثیر زیادی در شکل‌گیری شهرها و ساختار معماری آن منطقه دارند؛ بنابراین، تعیین دقیق پهنه‌های اقلیمی نواحی مختلف در ارائهٔ طرح‌های مناسب متناسب با اقلیم هر منطقه بسیار حائز اهمیت است. یکی از مسائل حیاتی در ساخت‌وساز، اماکن مسکونی و معماری اقلیمی، گرم‌کردن آنها در فصول سرد سال و خنک‌کردن آنها در فصول گرم سال برای رسیدن به حدود آسایش گرمایشی انسان است. در نتیجه، در نظر گرفتن تمهیدات خاص مربوط به شکل، اندازهٔ پنجره‌ها، ماهیت مصالح ساختمانی و شرایط اقلیمی می‌تواند به بیشترین صرفه‌جویی در گرمایش و سرمایش مناطق مسکونی منجر شود. مسألهٔ حیاتی در درک ارزش معماری هر دوره و هر منطقه این است که چگونه یک ساختمان را با اقلیم خاص آن منطقه تنظیم کرد. چگونه ساختمان از خورشید، نسیم و فضای سبز استفاده و چگونه معمار آب‌وهوایی کوچک را ایجاد می‌کند. یکی دیگر از عواملی که تأثیر عوامل اقلیمی بر ساختمان‌ها را کاهش می‌دهد، اندازهٔ ساختمان است. اگر یک شکل را چهاربرابر کنیم، نسبت حجم آن به سطح آن از ۱/٦ به ۱/۱۵ کاهش می‌یابد و در نتیجهٔ کاهش سطح بیرونی به حجم پوشش‌داده‌شده، تأثیر عوامل اقلیمی کاهش می‌یابد. با وجود این، می‌توان اصولی را برای ساختمان‌ها پیشنهاد کرد که عبارت‌اند از: ۱) در مناطق سردسیر، فرم‌های بسته و فشرده و ساختمان‌های مکعبی یا ساختمان‌های مجاور در پشت در سراسر محور شمال–جنوب ترجیح داده می‌شوند. در چنین مناطقی، ساختمان‌های مرتفع مناسب‌تر هستند. ۲) در آب‌وهوای معتدل، انتخاب فرم آسان‌تر و آزادتر است، اما به هر حال، فرم‌ها در امتداد محور شرقی– غربی ارجحیت دارند. ۳) در مناطق گرم و خشک، فرم‌های جامد و فشرده توصیه می‌شوند. فرم‌های مکعبی یا فرم‌هایی که ضلع شمالی–جنوبی بزرگ‌تری نسبت به ضلع شرقی– غربی خود دارند، بهتر هستند. ساختمان‌های مرتفع نیز بر ساختمان‌های کوتاه ارجحیت دارند. ٤) در مناطق مرطوب، ساختمان‌هایی که آزادانه در امتداد محور شرقی– غربی امتداد دارند مناسب‌تر هستند، اما ساختمان‌هایی که در امتداد محور شمال–جنوب امتداد دارند، به دلیل اینکه در معرض تابش شدید خورشید هستند، مناسب نیستند (Reuter & Reiter, 2019; Loghman, 2021).

در مجموع، از لحاظ فراوانی مؤلفه‌ها، بیشترین تکرار مربوط به جهت‌گیری ساختمان و مورفولوژی است. پس از آن، مؤلفه‌های بهینه‌سازی ضخامت عایق دیوار، بهینه‌سازی نسبت دیوار به پنجره و بهینه‌سازی ضخامت پنجره قرار دارند. سپس، مؤلفه‌های بهینه‌سازی چندهدفه و فرم ساختمان قرار دارند. در مرتبهٔ بعدی، ارتفاع دیوار، مصالح ساختمانی و آسایش حرارتی قرار دارند. تکرار سایر مؤلفه‌ها نیز به صورت یکسان است (شکل ۷).



شکل ۷- فراوانی مؤلفه‌های پژوهش (یافته‌های پژوهش)

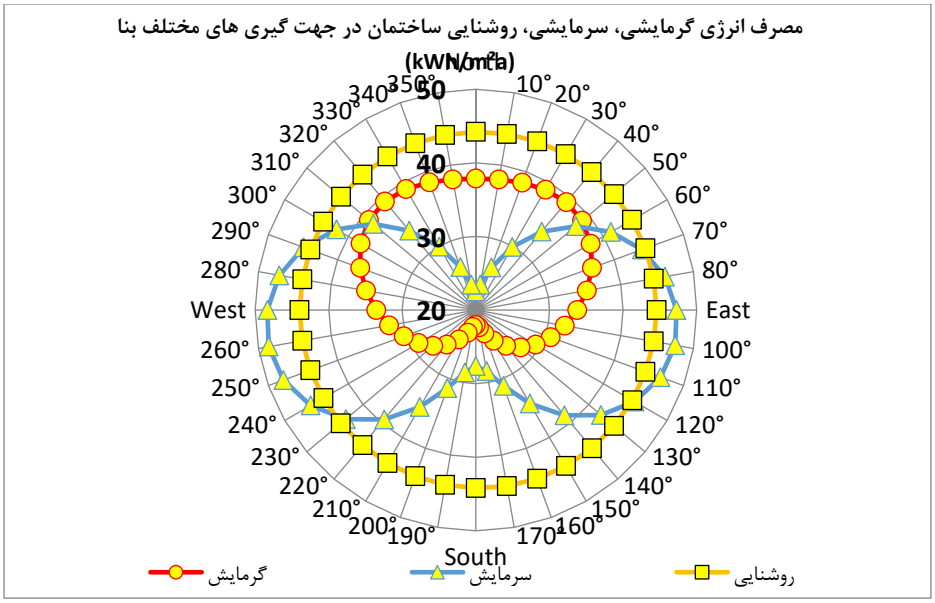
در ادامه، به صورت عملیاتی، جهت‌گیری ساختمان‌های مسکونی گروه ج (با مقیاس کاربری منطقه، ٦ تا ١٠ طبقه ارتفاع از روی زمین یا حداکثر زیربنای ۵۰۰۰ متر مربع) به عنوان مؤلفهٔ تأثیرگذار بر کارایی انرژی در شهر اصفهان بیان و بررسی شده است.

بررسی رفتار مصرف انرژی ساختمان‌ها و تعیین راهکارهایی که عملاً به کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها منجر می‌شوند، بدون استفاده از مدل‌سازی انرژی ممکن نیست. برای مدل‌سازی و تعیین میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها باید از یک نرم‌افزار مدل‌سازی دینامیک انرژی استفاده کرد که دقت زیادی داشته باشد و دست‌کم بتواند میزان مصرف انرژی گرمایشی، سرمایشی و روشنایی ساختمان را محاسبه کند (شکل ۸)؛ از این رو، برای تعیین تأثیر جهت‌گیری ساختمان‌ها در مصرف انرژی در گروه ساختمانی ج در شهر اصفهان، از نرم‌افزار دیزاین بیلدر [xxxi] استفاده شده است که از دقت کافی برخوردار است و همچنین یکی از به‌روزترین و دقیق‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان‌هاست. شبیه‌سازی‌ها برای محاسبهٔ میزان مصرف انرژی سالانهٔ ساختمان در جهت‌های مختلف، در گام‌های ۱۰درجه‌ای، انجام شده‌اند.

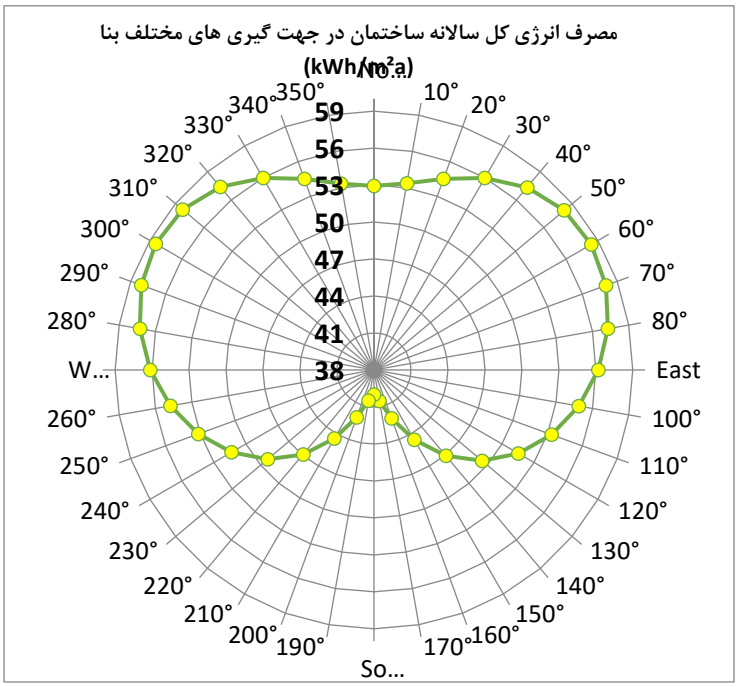
جهت‌گیری ساختمان همچنین از مبدأ شمال و در جهت حرکت عقربه‌های ساعت سنجیده می‌شود؛ این بدان معناست که جهت‌گیری شمالی دارای زاویهٔ صفر درجه، جهت‌گیری شرقی دارای زاویهٔ ۹۰ درجه و جهت‌گیری جنوبی و غربی به‌ترتیب دارای زاویهٔ ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه هستند (نصراللهی، ۱۳۹۸).

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها در ساختمان‌های مسکونی آپارتمانی گروه ج در شهر اصفهان نشان می‌دهد کمترین میزان انرژی گرمایشی در جهت‌گیری جنوبی رخ می‌دهد. انرژی سرمایشی ساختمان با جهت‌گیری شمالی و زوایای نزدیک به شمال و پس از آن، در جهت‌گیری جنوبی و زوایای نزدیک به آن به کمترین میزان و در جهت‌گیری‌های شرقی و غربی به بیشترین میزان می‌رسد. در مقایسه با مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی، جهت‌گیری ساختمان تأثیری فاحش بر مصرف انرژی روشنایی ساختمان ندارد.

بر اساس شکل (۹)، ساختمان‌های مسکونی آپارتمانی گروه ج رو به جنوب کمترین مصرف انرژی کل را دارند. مصرف انرژی کل، زمانی که ساختمان به سمت شرق یا غرب می‌چرخد، افزایش می‌یابد. بیشترین مصرف انرژی کل این ساختمان‌ها در ۳۰۰ درجه (شمال غربی) و ٦٠ درجه (شمال شرقی) رخ می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی‌ها و بررسی‌ها نشان می‌دهد جهت‌گیری بهینهٔ ساختمان از نظر مصرف انرژی کل، جهت‌گیری جنوبی است. با توجه به این نتایج، فقط جهت‌گیری بهینهٔ ساختمان‌های مسکونی آپارتمانی گروه ج در شرایط اقلیمی شهر اصفهان می‌تواند ۳۲ درصد از مصرف انرژی کل را در مقایسه با بیشترین میزان ممکن کاهش دهد (نصراللهی، ۱۳۹۸).



شکل ۸- میزان مصرف انرژی گرمایشی، سرمایشی و روشنایی ساختمان‌های مسکونی آپارتمانی گروه ج شهر اصفهان با جهت‌گیری‌های متفاوت (کیلووات ساعت بر مترمربع در سال)



شکل ۹- میزان مصرف انرژی کل (مجموع انرژی گرمایشی، سرمایشی و روشنایی) ساختمان‌های مسکونی آپارتمانی گروه ج شهر اصفهان با جهت‌گیری‌های متفاوت (کیلووات ساعت بر مترمربع در سال)

نتیجه‌گیری

در شرایط جهانی که با افزایش جالب توجه تقاضا و قیمت انرژی و کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی مشخص شده است، نیاز به امنیت انرژی و حفاظت از محیط‌زیست هرگز مهم‌تر از زمان فعلی نبوده است. به دلیل اثرات منفی زیست‌محیطی و مصرف شدید انرژی، بخش ساختمان بیش از یک‌سوم مصرف انرژی نهایی جهانی و نزدیک به ٤٠ درصد از کل انتشار مستقیم و غیرمستقیم دی‌اکسید کربن را تشکیل می‌دهد. بر این اساس، موضوع بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها توجه بسیاری از پژوهشگران را در سراسر جهان برانگیخته است. تجزیه‌وتحلیل یکپارچهٔ نتایج پژوهش‌های مختلف بیانگر آن است که ورودی‌های بهینه باعث کاهش گرمایش/سرمایش ساختمان و کاهش مصرف انرژی ساختمان می‌شوند. طبق یافته‌های پژوهش، اجرای پارامترهای مختلف مانند نمای دوپوسته؛ جهت‌گیری ساختمان و مورفولوژی؛ فرم ساختمان؛ بهینه‌سازی ضخامت عایق دیوار؛ بهینه‌سازی نسبت دیوار به پنجره؛ بهینه‌سازی ضخامت پنجره؛ حسگر شبکهٔ بی‌سیم؛ ارتفاع دیوار؛ وجود ساختمان مجاور؛ مصالح بام؛ آسایش حرارتی؛ سرمایش و گرمایش غیرفعال؛ برنامه‌ریزی مبتنی بر انرژی برای یک سایت؛ منابع انرژی جایگزین؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ نور و سایبان می‌تواند مصرف انرژی ساختمان را کاهش دهد. این یافته‌ها با مبانی نظری و پیشینهٔ پژوهش هم‌خوانی دارد؛ به طوری که سادینی [xxxiii] و همکاران (۲۰۱۱) به طور مشخص بر مؤلفه‌های پوستهٔ ساختمان و سایبان تمرکز دارند و این امر نشان‌دهندهٔ همگرایی جهانی در شناسایی پارامترهای فیزیکی کلیدی مؤثر بر مصرف انرژی ساختمان است. همچنین، مبانی نظری و یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد فرم و پوستهٔ ساختمان در اقلیم‌های سرد، معتدل، گرم و خشک و مرطوب متفاوت است و این موارد بر مطالعات نعمتچوا [xxxiv] (۲۰۱۸) در خصوص ضخامت بهینهٔ عایق دیوار در اقلیم‌های مختلف منطبق است. نتایج این پژوهش در شناسایی روندهای نوظهوربهینه‌سازی چندهدفه و سیستم‌های هوشمند از جمله حسگر شبکهٔ بی‌سیم با مطالعات آیزنهاور [xxxv] (۲۰۱۲) هم‌خوانی دارد.

نتایج پژوهش حاضر را می‌توان به منظور کمک به صاحبان خانه و معماران برای طراحی و ساخت ساختمان‌های کارآمد انرژی در کشور استفاده کرد. تفاوت پژوهش حاضر با پژوهش‌های گذشته در این است که هر یک از پژوهش‌های گذشته روی یک یا دو مؤلفه از عناصر تأثیرگذار بر صرفه‌جویی انرژی متمرکز شده‌اند، در حالی که پژوهش حاضر نتایج آنها را با هم تلفیق کرده و به چارچوبی جامع دست یافته است.

یکی از نقدهای واردشده بر منابع در دورهٔ زمانی بررسی‌شده این است که عمدتاً بر جهت‌گیری و مورفولوژی، ضخامت دیوار و پنجره، بهینه‌سازی چندهدفه و فرم ساختمان

متمرکز شده‌اند و از سایر مؤلفه‌ها و عوامل تأثیرگذار بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها غفلت کرده‌اند. در حالی که مؤلفه‌های تأثیرگذار بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها متنوع هستند و به تناسب پیشرفت‌های فناورانه تغییر می‌کنند. در این میان، کاربست فناوری‌های بی‌سیم و بهره‌گیری از منابع انرژی جایگزین در برنامه‌ریزی سایت و طراحی ساختمان‌ها از جملهٔ مؤلفه‌هایی هستند که روزبه‌روز بر ارزش آنها افزوده می‌شود و میزان تأثیرگذاری آنها در کاهش مصرف انرژی هم چشمگیر است؛ از این رو، می‌طلبد که منابع و پژوهش‌های جدید به طرزی ویژه به آنها توجه کنند. از طرف دیگر، مؤلفه‌های تأثیرگذار بر مصرف انرژی در ساختمان‌ها به صورت یک کل یکپارچه عمل می‌کنند و تأثیر آنها به صورت هم‌افزاست؛ بنابراین، کاربست منفرد آنها تأثیرگذاری عمیقی بر مصرف انرژی نخواهد گذاشت.

همچنین، در این پژوهش جهت‌گیری ساختمان‌های مسکونی گروه ج (با مقیاس کاربری منطقه، ٦ تا ١٠ طبقه ارتفاع از روی زمین یا حداکثر زیربنای ۵۰۰۰ متر مربع) به عنوان مؤلفهٔ تأثیرگذار بر کارایی انرژی در شهر اصفهان بررسی شده است. در این راستا، برای تعیین تأثیر جهت‌گیری ساختمان‌ها در مصرف انرژی در گروه ساختمانی ج در شهر اصفهان، از نرم‌افزار دیزاین بیلدر استفاده شده است که از دقت کافی برخوردار است و همچنین یکی از به‌روزترین و دقیق‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان‌هاست. نتایج بررسی نشان می‌دهد پتانسیل صرفه‌جویی انرژی با جهت‌گیری مناسب ساختمان‌های مسکونی آپارتمانی گروه ج در اقلیم اصفهان برای مصرف انرژی کل ۳۲ درصد است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان دریافت امکان صرفه‌جویی میزان زیادی انرژی در ساختمان‌های مسکونی آپارتمانی گروه ج به‌تنهایی از طریق جهت‌گیری مناسب وجود دارد؛ از این رو، جهت‌گیری بهینهٔ ساختمان از نظر مصرف انرژی برای ساختمان‌های مسکونی آپارتمانی گروه ج در شهر اصفهان، جهت‌گیری جنوبی است. استفاده از شبیه‌سازی انرژی در این پژوهش به عنوان ابزار تحلیل و اعتبارسنجی منطبق بر مطالعات کراولی [xxxvi] و همکاران (۲۰۰۸) به عنوان روش، استاندارد طلایی در پژوهش‌های بین‌المللی برای کمّی‌سازی تأثیر راهکارهاست.

گفتنی است، محدودیت‌های این پژوهش شامل محدودیت‌های مرتبط با داده‌ها و اطلاعات، دسترسی ناقص یا نامتقارن به داده‌ها، کیفیت داده‌ها و قابلیت اطمینان داده‌ها و همچنین عدم وجود داده‌های پایه‌ای یکپارچه در قالب یک سامانهٔ یکپارچهٔ اطلاعات جغرافیایی (GIS)[xxxvii] است که لایه‌های اطلاعاتی انرژی، کاربری اراضی، بافت فرسوده، تراکم جمعیت و ... را هم‌زمان پوشش دهد. بسیاری از راهکارهای بهینه‌سازی ارائه‌شده نیازمند سرمایه‌گذاری اولیهٔ کلان هستند. در این راستا، پژوهش حاضر ممکن است نتواند چگونگی تأمین این منابع در شرایط محدودیت بودجه‌ای شهرداری و دولت را به طور واقع‌بینانه تحلیل کند؛ بنابراین، محدودیت‌های اقتصادی و مالی نیز وجود دارند. تعدد ذی‌نفعان و نهادهای تصمیم‌گیر مدیریت انرژی شهری میان شهرداری، وزارت نیرو، وزارت نفت، وزارت راه و شهرسازی، استانداری و ... تقسیم شده است. هماهنگی بین این نهادها چالشی بزرگ است و هماهنگی بین این دستگاه‌ها از جملهٔ محدودیت‌های نهادی، قانونی و حکمرانی این پژوهش است.

در ارتباط با پیشنهاد پژوهش‌های آینده باید از رویکرد تک‌بُعدی و فنی صرف فراتر رفت و دیدگاه سیستماتیک، میان‌رشته‌ای و زمینه‌گرا را در پیش گرفت. ترکیب روش‌های کمّی و کیفی، مشارکت‌دادن ذی‌نفعان در فرایند پژوهش و توجه هم‌زمان به ابعاد فنی، اقتصادی، اجتماعی، نهادی و محیط‌زیستی کلید ارائهٔ راهکارهای عملی و پایدار است. همچنین، انجام مطالعات آزمایشی در مقیاس کوچک (پایلوت) قبل از تعمیم به سطح کل شهر می‌تواند ریسک خطا و هزینه را کاهش دهد. در این راستا، مطالعات آینده در سه سطح کلان، خرد و روش‌شناختی ارائه می‌شوند.

الف) پیشنهادهای مطالعاتی در سطح کلان و سیاستی:

- تحلیل نهادی و حکمرانی انرژی در کلان‌شهرهای ایران؛
- ارزیابی اثربخشی مشوق‌ها و ابزارهای مالی بر سرمایه‌گذاری بخش خصوصی و خانوارها در بهینه‌سازی انرژی؛
- سنجش تاب‌آوری انرژی در برابر شوک‌های اقلیمی و اقتصادی.

ب) پیشنهادهای مطالعاتی در سطح خرد و فنی–اجتماعی:

- رفتارشناسی مصرف انرژی در گروه‌های اجتماعی‌اقتصادی مختلف؛
- راهکارهای بهینه‌سازی انرژی در بافت‌های تاریخی و دارای ارزش میراثی؛
- اقتصاد چرخشی و انرژی در محیط شهری.

پ) پیشنهادهای مطالعاتی روش‌شناختی و یکپارچه‌نگر:

- تدوین شاخص‌های ترکیبی پایداری انرژی شهری؛
- به‌کارگیری روش‌های آینده‌پژوهی در برنامه‌ریزی انرژی شهری.

References

Abdou, N., Mghouchi, Y. E., Hamdaoui, S., Asri, N. E., & Mouqallid, M. (2021). Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco. *Building and Environment*, *204*, 108141. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108141

Ciardiello, A., Rosso, F., Dell'Olmo, J., Ciancio, V., Ferrero, M., & Salata, F. (2020). Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in building energy design. *Applied Energy*, *280*, 115984. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115984

Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Renew. Sustain. Energy Review*, *37*, 123–141. https://doi. org/10.1016/j.rser.2014.05.007

Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, *43*(4), 661-673. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027

Deng, X., Wang, M., Sun, D., & Fan, Z . (2020). Effect of building form on energy consumption of academic library buildings in different climate zones in China. *Earth and Environmental Science*, *531*, 012060. https://doi.org/10.1088/1755-1315/531/1/012060

Du, T., Jansen, S., Turrin, M., & van den Dobbelsteen, A. (2019). Impact of space layout on energy performance of office buildings coupling daylight with thermal simulation. *E3S Web of Conferences*, *111*, 03077. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911103077

Du, T., Jansen, S., Turrin, M., & van den Dobbelsteen, A. (2020). Effects of architectural space layouts on energy performance: A review. *Sustainability*, *12*(5), 1829. https://doi.org/10.3390/su12051829

Eisenhower, B., O'Neill, Z., Narayanan, S., & Fonoberov, V. A. (2012). A methodology for meta-model-based optimization in building energy models. *Energy and Buildings, 47,* 292-301 https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778811005594

Faizi, F., Noorani, M., Ghaedi, A., & Mahdavinejad, M. (2011). Design an optimum pattern of orientation in residential complexes by analyzing the level of energy consumption (Case Study: Maskan Mehr Complexes, Tehran, Iran). *Procedia Engineering*, *21*, 1179–1187. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2128

Forcael, E., Nope, A., García-Alvarado, R., Bobadilla, A., & Rubio- Bellido, C. (2019). Architectural and management strategies for the design, construction and operation of energy-efficient and intelligent primary care centers in Chile. *Sustainability*, *11*(2), 464. https://doi.org/10.3390/su11020464

García-Sanz-Calcedo, J. (2014). Analysis on energy effciency in healthcare buildings. *Journal of Healthcare Engineering*, *5*, 361–374. https://doi.org/10.1260/2040-2295.5.3.361

Gökçe, H. U., Gökçe, K. U. (2021). Intelligent energy optimization system development and validation for German building types. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, *16*(4), 1299–1316. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab049

Gou, S., Nik, V. M. , Scartezzini, J. L., Zhao, Q., & Li, Z. (2018). Passive design optimization of newly built residential buildings in Shanghai for improving indoor thermal comfort while reducing building energy demand. *Energy and Buildings*, *169*, 484–506. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.095

Hilal, N. A., Haggag, M., & Saleh, A. D. (2023). Optimizing energy efficiency in high-rise residential buildings in Abu Dhabi's hot climate: Exploring the potential of double-skin façades. *Buildings*, *13*, 2148. https://doi.org/10.3390/buildings13092148

Hromádka, V., Korytárová, J., Federla, J., Veselý, A., & Skalický, M. (2023). Optimizing energy-saving measures in new residential buildings regarding life-cycle costs. *Buildings*, *13*(4), 1029. https://doi.org/10.3390/buildings13081907

Khamma, T. R., & Boubekri, M. (2017). Statistical analysis of the impact of building morphology and orientation on its energy performance. *Journal of Engineers and Architecture*, *5*(2), 15-25. https://doi.org/10.15640/jea.v5n1a2

Lamrani Alaoui, A., Amrani, A.-I., Mousavi Ajarostaghi, S. S., Saffari Pour, M., Salhi, J.-E., & Halimi, M. (2023). An investigation towards optimizing the construction materials and configurations of buildings for improving energy efficiency and consumption in Morocco. *Buildings*, *13*(7), 1705. https://doi.org/10.3390/buildings13071705

Lapisa, R. (2019). The effect of building geometric shape and orientation on its energy performance in various climate regions. *International Journal of GEOMATE*, *16*, 113–119. https://doi.org/10.21660/2019.53.94984

Leupen, B., & Mooij, H. (2008). *Het ontwerpen van*

Renuka, S. M., Maharani, C. M., Nagasudha, S., & Raveena Priya, R. (2022). Optimization of energy consumption based on orientation and location of the building. *Materials Today Proceedings*, *65*(4), 527-536. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.081

Reuser, B., & Uytenhaak, R. (2006). Prototypen of reeksen [Prototypes or Series]. *de Architect*, *37*(11), 20–23. https://scholar.google.com/scholar?q=%22Prototypen+of+reeksen%22+Reuser+Uytenhaak

Reuter, I., & Reiter, S. (2019). Development of a multi-criteria analysis method to optimize the sustainable architectural design of residential buildings. *Materials Science and Engineering*, *609*, 072062. https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/7/072062

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

Santamouris, M., Vasilakopoulou, K. (2021). Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, *1*, 100002. https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002

Sherwood, R. (2017). *Modern housing prototypes*. Cambridge: Harvard University Press.

Sun, Z., Cao, Y., Wang, X., & Yu, J. (2021). Multi-objective optimization design for windows and shading configuration: consenergy consumption, thermal environment, visual performance and sound insulation effect. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, *12*, 805–836. https://doi.org/10.1007/s40095-021-00413-0

Tadeu, A., Škerget, L., Almeida, J., & Simões, N. (2021). Canopy contribution to the energy balance of a building's roof. *Energy and Buildings*, *244*, 111000. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111000

Todorovic, M. (2016). New type of residential building configuration. *Architecture and Civil Engineering*, *14*(1), 47–58. https://doi.org/10.2298/FUACE1601047T

Touloupaki, E., & Theodosiou, T. (2017). Optimization of building form to minimize energy consumption through parametric modelling. *Procedia Environmental Sciences*, *38*, 509–514. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.114

van Zwol, J. (2009) . *Het woongebouw, Klassieke en recente ontwerpen* [The residential Building, Classic and Recent Designs] (pp. 20-22). Amsterdam: Uitgeverij SUN. https://www.bol.com/nl/nl/s/?searchtext=Het+woongebouw+Klassieke+en+recente+ontwerpen

woningen, Een handboek (pp. 170-171). Rotterdam: NAI Uitgevers.

Loghman, M. (2021). Researching on sustainable architecture in-Approach to energy efficiency. *International Journal of Urban Management Energy Sustainability*, *2*(2), 73-79. https://doi.org/10.22034/jumes.2020.242518

Morsi, D. M. A., Ismaeel, W. S. E., & Abd El-Hamed, A. E. (2020). Life cycle assessment of a residential building in Egypt: A case study. *Materials Science and Engineering*, *974*, 012028. https://doi.org/10.1088/1757-899X/974/1/012028

Nadhim Majeed, M., Ali Mustafa, F., & Ali Husein, H. (2019). Impact of building typology on daylight optimization using building information modeling: Apartments in Erbil City as a case study. *Journal of Daylighting*, *6*(2), 187–201. https://doi.org/10.15627/jd.2019.17

Nasrollahi, F. (2019). *Research project for studies and development of sustainable and climate design criteria for buildings in Isfahan city (based on renewable energies such as solar energy, etc.).* Client: Deputy of Planning, Research and Information Technology of Isfahan Municipality, Implementer: Isfahan University of Art. [In Persian]

Nematchoua, M. K., Ricciardi, P., & Reiter, S. (2018). A comparative study on optimum insulation thickness of walls and energy savings in equatorial, tropical, and subtropical climates. *Journal of Cleaner Production*, *194*, 456-470 http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsbe.2017.02.001

NEXT Architects. (2008). *Density Studies*. [online] NEXT. Available at: http://www.nextarchitects.com/en/projects/density_studies [accessed 01 March 2016].

Ochedi, T. E., & Taki, A. (2022). A framework approach to the design of energy-efficient residential buildings in Nigeria. *Energy and Built Environment*, *3*, 384–397. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.07.001

Omar Baneaez, M. O., & Akkoyunlu, M. T. (2023). A study of energy efficiency simulation programs and energy saving optimization analysis of building envelopment parameters in Turkey. *Journal of Ecological Engineering*, *24*(9), 202–217. https://doi.org/10.12911/22998993/169178

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, *40*(3), 394–398. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007

Ren, W., Zhao, J., & Chang, M. (2023). Energy-saving optimization based on residential building orientation and shape with multifactor coupling in the Tibetan areas of western Sichuan, China. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *22*(3), 1476-1491. https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2085725

Wang, W., & Hu, Z. (2022). Green building energy efficiency evaluation and optimization. *Journal of Physics: Conference Series, 2185*(1), 012052. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2185/1/012052

Wolfswinkel, J. F., Furmueller, E., & Wilderom, C. P. M. (2013). Using grounded theory as a method for rigorously reviewing literature. *European Journal of Information Systems, 22*(1), 45–55. https://doi.org/10.1057/ejis.2011.51

Zhang, L., Zhang, L., & Wang, Y. (2016). Shape optimization of free-form buildings based on solar radiation gain and space efficiency using a multi-objective genetic algorithm. *Solar Energy, 132*, 38–50. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.053

[i] Roger Sherwood
[ii] Quatremère de Quincy
[iii] Giulio Carlo Argan
[iv] Aldo Rossi
[v] Faculty of Architecture of the Delft University of Technology
[vi] NEXT Architects bureau
[vii] Bart Reuser
[viii] Professor Rudy Uytenhaak
[ix] Blocks library
[x] Super block on Java Island in Amsterdam
[xi] Patio types on Borneo Island
[xii] High-patio block
[xiii] Massive tower on Mullerpier
[xiv] Bernard Leupen
[xv] Harald Mooij
[xvi] TU Delft
[xvii] Mat
[xviii] Jasper van Zwol
[xix] Wolfswinkel
[xx] Building typology
xxi Climate compatible architecture
xxii Energy performance of buildings
xxiii Energy saving in residential buildings
xxiv Energy-saving optimization
[xxv] Energy Efficiency of Building
[xxvi] Design of energy efficient residential buildings
[xxvii] Typology and Energy performance
[xxviii] Sustainable Architecture in Approach to Energy Efficiency
[xxix] Double-loaded plan
[xxx] Insulation cork boards (ICBs)
[xxxi] The leaf area index (LAI)
[xxxii] DesignBuilder
[xxxiii] Sadineni
[xxxiv] Nematchoua
[xxxv] Eisenhower
[xxxvi] Crawley
[xxxvii] Geographic Information System