مرور پارامترهای طراحی پوسته ساختمان در جهت کاهش مصرف انرژی (نمونه موردی: بناهای مسکونی متداول منطقه ۱۵)[1]

رضا سلیمی گرگری* ، سیدمجید مفیدی شمیرانی** ، هانیه صنایعیان***

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۴

نوع مقاله: پژوهشی- ۱۳۱-۱۱۳

چکیده

با توجه به نقش کلیدی نمای ساختمان به عنوان پوسته و تأثیرات آن بر کیفیت فضاهای داخلی و مصرف انرژی، بهینه سازی نما در فرآیند طراحی یک ساختمان بسیار حائز اهمیت است. از سوی دیگر با توجه به چالش‌ها و پیچیدگی روش‌های سنتی بهینه‌سازی، استفاده از روش‌های نوین برای ارزیابی در مراحل ابتدایی طراحی ضروری به نظر می‌رسد. شناسایی راهکارها و استراتژیهای بهینه سازی پارامترهای طراحی پوسته ساختمان، به معماران این امکان را می‌دهد که در همان مراحل اولیه طراحی تأثیر به سزایی در رفتار حرارتی ساختمان داشته باشند. مقاله حاضر یک مرور جامع با تأکید بر مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر در زمینه پوسته ساختمان و پارامترهای مؤثر بر رفتار حرارتی داخل بناست و بخشی از تحقیقات گسترده‌تری است که هدف آن ارائه راهکارهای طراحی برای کاهش مصرف انرژی در نماها می‌باشد. هدف اصلی این تحقیق مطالعه مروری بر تمام منابع موجود در این زمینه می‌باشد و در این راستا، پارامترهای کالبدی نما بر اساس مطالعات انجام شده، مورد بررسی سیستماتیک قرار گرفته است و پس بررسی و مرورو دقیق مطالعات انجام شده در این زمینه، پارامترهای تأثیرگذار در پوسته ساختمان بر رفتار حرارتی داخلی بنا، استخراج و دسته‌بندی شده‌اند. در مرحله اول، با بررسی منابع مرتبط و مطالعات مشابه، پارامترهای کالبدی نما به صورت کامل بررسی شده است و در بخش دوم تیپ‌های مختلف نماها در منطقه ۱۵ مورد بررسی قرار گرفته است.. نقشه GIS منطقه با دقت بررسی شده و تیپ‌های مختلف نماها به روش میدانی استخراج شده‌اند. سپس با در نظر گرفتن طول نماهای یکسان، بر اساس نقشه و فضاهای موجود در نماهای اصلی، بناها دسته‌بندی شده و گونه‌های نهایی مشخص می‌شوند.

واژگان کلیدی: پوسته ساختمان، تیپولوژی، بار گرمایشی، مصرف انرژی، نمای پایدار.

۱. این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول تحت عنوان «تبیین بهینه سازی پارامترهای طراحی پوسته ساختمان در جهت کاهش مصرف انرژی (نمونه موردی: بناهای مسکونی متداول شهر تهران)» است که در دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات (تهران) به راهنمایی نویسنده دوم و سوم در حال تدوین است.

*دانشجوی دکتری معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران r.salimi1402@gmail.com

** استادیار گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران S_m_mofidi@ iust.ac.ir

*** نویسنده مسئول: استادیار گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران Sanayeayan@iust.ac.ir

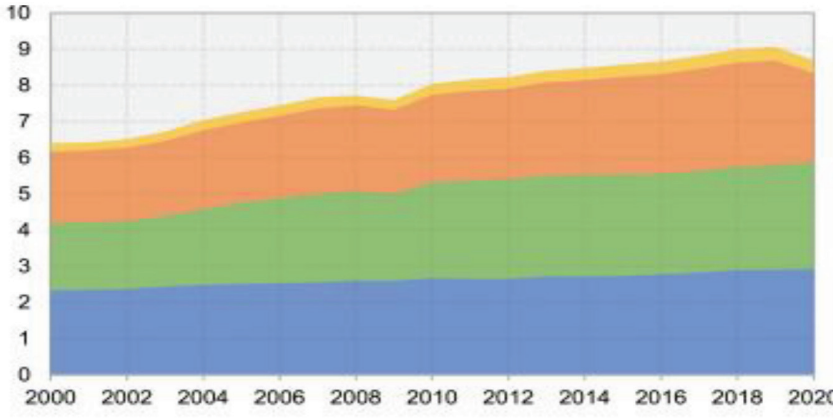
CC BY NC

مقدمه

تا به امروز انرژی مصرفی جهان از منابع مختلف و عمدتاً از منابع فسیلی تأمین شده است. اما مسائل و مشکلات متعدد از جمله محدودیت و پایان‌پذیر بودن منابع فسیلی و اثرات زیست‌محیطی ناشی از سوزاندن این منابع ضرورت صرفه‌جویی در مصرف انرژی با بهینه‌سازی مصرف آن و نیز جایگزینی منابع دیگر انرژی بخصوص انرژی‌های تجدیدپذیر را آشکار نموده است (González-Torres, Pé rez-Lombard, Coronel, Maestre, & Yan, 2022).

آژانس بین المللی انرژی اعلام کرده است که تا سال ۲۰۲۵، منابع نفت دنیا به پایان می‌رسد و پس از این زمان، قیمت نفت افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند (Cronshaw, 2015).در نتیجه لازم است استفاده از منابع انرژی‌های طبیعی بیش از پیش مورد توجه قرار گیرند. در سال‌های اخیر تلاش‌های چشمگیری برای بهبود بهره وری و کاهش مصرف انرژی انجام شده است. مفهوم بهره وری انرژی در ساختمان‌ها، مربوط به تأمین انرژی مورد نیاز برای دستیابی به شرایط محیطی مطلوب و کاهش حداکثری مصرف انرژی است. سیاست‌های مدیریت انرژی تلاش کرده‌اند تا با مسائل مربوط به انرژی در سراسر جهان سر و کار داشته باشند. این مسائل عبارتند از محدودیت‌های انرژی، از قبیل بحران کمبود سوخت، مسایل زیست محیطی، تغییرات آب و هوا و... در این راستا طرح‌های بلند مدت و کوتاه مدت مطابق با چارچوب پایداری توسط نهادهای مرتبط پیشنهاد شده‌اند (Hafez et al., 2023; Pé rez-Lombard, Ortiz, & Velázquez, 2013).

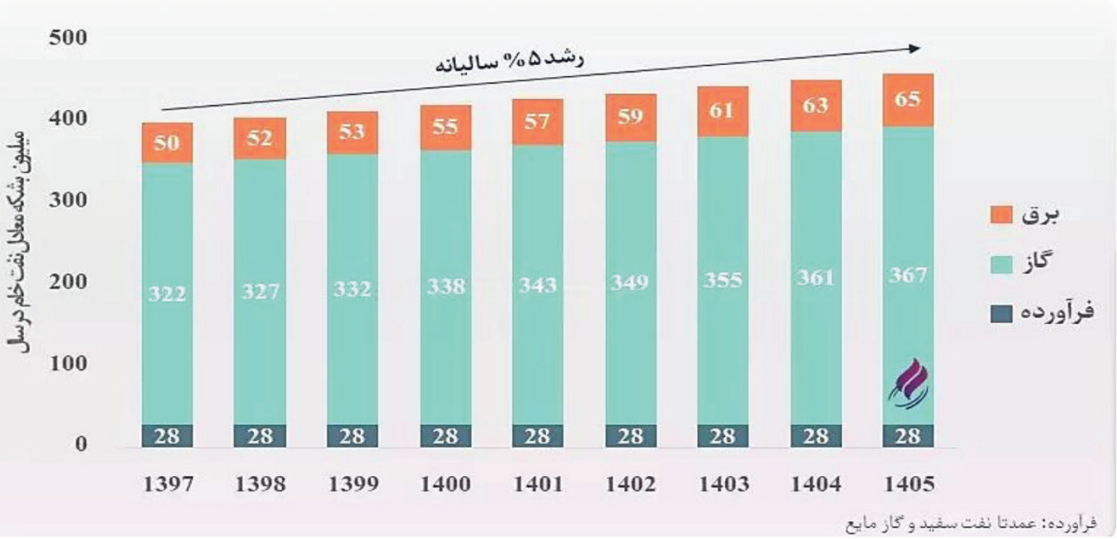
مصرف انرژی در بخش مسکونی به میزان انرژی مصرفی خانوارها در خانه‌هایشان اشاره دارد. این انرژی معمولاً برای گرمایش، سرمایش، روشنایی، الکترونیک، لوازم خانگی و سایر فعالیت‌های خانگی استفاده می‌شود. بر اساس گزارش اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده[1]، بخش مسکونی حدود ۲۰ درصد از کل مصرف انرژی را در سال ۲۰۲۰ به خود اختصاص داده است (شکل۱). در بخش مسکونی، گرمایش فضا بزرگترین مصرف نهایی انرژی با حدود ۳۵ درصد است. کل مصرف انرژی مسکونی دیگر کاربردهای مهم دیگر شامل گرمایش آب، روشنایی و تهویه مطبوع است. سطح مصرف انرژی در بخش مسکونی می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند اندازه و قدمت خانه‌ها، کارایی وسایل و مصالح ساختمانی و رفتار کاربر و انتخاب سبک زندگی باشد. از آنجایی که نگرانی‌ها در مورد تغییرات آب و هوا و امنیت انرژی همچنان افزایش می‌یابد، علاقه فزاینده‌ای به ترویج اقدامات صرفه‌جویی و کارایی انرژی در بخش مسکونی افزایش یافته است (González-Torres et al., 2022).



شکل ۱: مصرف انرژی بخش مسکونی و بقیه صنایع (رنگ آبی) (González-Torres et al., 2022)

1.U.S. Energy Information Administration (EIA)

ایـران هـر سـاله بـا کمبـود عرضـه گاز طبیعـی در فصـل زمسـتان مواجـه اسـت و ایـن گونـه بـه نظـر می‌رسـد کـه تنهـا راهـکار بـرای مواجـه بـا ایـن مشـکل یافتـن راهـی در جهـت کاهـش میـزان مصـرف گاز طبیعـی اسـت. در شـکل ۲ روند رشـد تقاضـای انـرژی در بخـش خانگـی بـه تفکیـک هـر یـک از حامل‌هـای انـرژی اشـاره شـده اسـت. همـان طـور کـه مشـخص اسـت، ایـن بخـش مصـرف سـالانه بـا رشـد متوسـط ۵ درصـدی مواجـه خواهـد بـود. در ۰ رونـد رشـد تقاضـای انـرژی در بخـش خانگـی بـه تفکیـک هـر یـک از حامل‌هـای انـرژی اشـاره شـده اسـت. همـان طـور کـه مشـخص اسـت، ایـن بخـش مصـرف سـالانه بـا رشـد متوسـط ۵ درصـدی مواجـه خواهـد بـود (vcmstudy.ir ،1402).



شکل ۲: مصرف انرژی بخش مسکونی 1402، vcmstudy.ir

بـه ایـن ترتیـب، آگاهـی روز افـزون در مـورد انـرژی و منابـع مصرفـی، باعـث ایجـاد حرکتـی بـه سـوی طراحـی معمـاری انـرژی کارا گردیده اسـت. ایـن حرکـت بـه منظـور ایجـاد سـاختمان‌های مطلوب‌تـر بـا مصـرف انـرژی کمتـر مـورد توجـه قـرار گرفتـه اسـت. عملکـرد حرارتـی سـاختمان‌ها بـه طـور کلـی تحـت تأثیـر سـه عامـل اصلـی قـرار دارد: خصوصیـات اقلیمـی منطقـه، ویژگی‌هـای فیزیکـی سـاختمان، و تأمیـن آسـایش حرارتـی مـورد نیـاز در داخـل سـاختمان (Gero, D'Cruz, & Radford, ۱۹۸۳). در ایـن میـان، فیزیـک سـاختمان بـا تأکیـد بـر پارامترهـای پوسـته بنـا، می‌توانـد تـا حـد قابـل توجهـی بـر عملکـرد انـرژی و آسـایش حرارتـی سـاختمان تأثیر بگـذارد. بـه طـور قطـع پارامترهـای هندسـی سـاختمان از اهمیـت بسـزایی بـرای بهینه‌سـازی رفتـار حرارتـی آن برخوردارنـد. در زیـر بـه برخـی از ایـن پارامترهـا اشـاره می‌شـود:

شکل ساختمان:

شـکل هندسـی سـاختمان می‌توانـد تأثیـر زیـادی بـر تابـش حرارتـی و تعـادل حرارتـی داشـته باشـد. سـاختمان‌های بـا شـکل‌های هندسـی مناسـب، ماننـد طراحی‌هـای بـا فرم‌هـای مسـتطیلی یـا مربعـی کـه نسـبت سـطح بـه حجـم مناسـبی دارنـد، می‌تواننـد انتقـال حـرارت را بهبـود بخشـیده و مصـرف انـرژی را کاهـش دهنـد.

نسبت طول به عرض:

نسـبت طـول بـه عـرض سـاختمان نقـش اساسـی در تابـش حرارتـی و انتقـال حـرارت از سـطح خارجـی بـه داخـل دارد. بـا توجـه به شـرایط محیطـی و عملکـرد بنـا، تعییـن نسـبت مناسـب می‌توانـد بـه بهینه‌سـازی رفتـار حرارتـی سـاختمان و کاهـش مصـرف انـرژی کمـک کنـد.

نسبت پنجره به کف:

نسبت پنجره به کف نشان‌دهنده میزان نور خورشیدی و تابش مستقیمی است که وارد ساختمان می‌شود. مدیریت مناسب این نسبت می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی ساختمان داشته باشد.

نسبت شیشه به دیوار:

میزان استفاده از شیشه در نماهای ساختمان تأثیر زیادی بر انتقال حرارت دارد. نسبت مناسبی بین سطوح شیشه و دیوارها به کاهش انتقال حرارت ناخواسته کمک می‌کند.

بررسی و بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند به طراحان و معماران کمک کند تا ساختمان‌هایی با بهره‌وری انرژی بالا و رفتار حرارتی بهینه ایجاد کنند.

بررسی همزمان پارامترها با توجه به ساختمان‌های متداول و در حال ساخت می‌تواند راهکارهای مؤثر، در مراحل اولیه طراحی در اختیار طراحان و معماران قرار دهد. برای این منظور در مرحله اول باید گونه‌شناسی ساختمان‌های متداول مناطق مختلف به صورت دقیق بررسی شود و پس از دسته‌بندی، در اختیار محققان انرژی قرار گیرد تا با توجه به داده‌های واقعی، راهکارهای طراحی برای هر منطقه را در اختیار معماران قرار دهند. هدف از این مقاله در مرحله اول مرور جامع مطالعات انجام شده در این زمینه و در مرحله دوم دسته‌بندی و گونه‌شناسی مساکن متداول منطقه ۱۵ شهرداری تهران می‌باشد.

مبانی نظری

پوسته خارجی ساختمان از آن جهت که در ارتباط مستقیم با محیط خارج قرار دارد از چند جهت دارای اهمیت است. نخست آنکه پوسته خارجی در ارتباط مستقیم با هوای کنترل نشده بیرون ساختمان قرار گرفته و در معرض هوای سرد زمستان و هوای گرم تابستان قرار دارد. از سوی دیگر همین بخش از ساختمان در ارتباط با تابش خورشید قرار داشته و تعیین کننده میزان جذب انرژی تابشی و بهره‌برداری از نور خورشید است. بنابراین در تعیین میزان تبادل حرارتی ساختمان با محیط اطراف تأثیرگذار است. پوسته ساختمان به طور معمول از ترکیب سطوح نیمه شفاف، شفاف و کدر تشکیل شده است و بر انرژی گرمایشی، سرمایشی و روشنایی مورد نیاز ساختمان تأثیر می‌گزارد. ویژگی‌هایی چون هدایت حرارتی سطوح، انرژی خورشیدی منتقل شده از طریق پنجره، سایه‌اندازی و ..عوامل تعیین کننده رفتار حرارتی بنا می‌باشند (Heiselberg et al., 2009; Lee, Jung, Park, Lee, & Yoon, 2013). سیستم‌های شیشه‌ای می‌توانند با استفاده مستقیم از نور روز (Monsen, Klein, & Beckman, 1981) و همچنین افزایش مستقیم انرژی گرمایشی خورشید (Oliveira & de Oliveira Fernandes, 1992) بر عملکرد حرارتی تأثیرگزار باشند در حالی که سطوح خارجی کدر می‌توانند تأثیرات غیر مستقیم بگذارند(Whillier, 1953).

تحقیقات زیادی در زمینه بهینه‌سازی اجزای پوسته ساختمان انجام شده است. این تحقیقات به دنبال یافتن ارتباطات میان اجزای پوسته ساختمان و مصرف سالانه انرژی، آسایش حرارتی، تجزیه و تحلیل چرخه حیات ساختمان و موارد مشابه می‌باشند.

(Anastaselos, Oxizidis, & Papadopoulos, 2011; Bojić, Miletić, & Bojić, 2014; Bolattü rk, 2006; Çomakl & Yü ksel, 2004; Cvetković & Bojić, 2014; Hasan, 1999; Huang et al., 2014; Kaynakli, 2012; Lulic, Civic, Pasic, Omerspahic, & Dzaferovic, 2014; Nyers, Kajtar, Tomić, & Nyers, 2015; Ozel, 2011, 2014; Roberts, Webber, & Ezekoye, 2015).

ارتباط بین پوسته و پایداری ساختمان

پوشش ساختمان، شامل دیوارها، سقف، عایق‌ها، پنجره‌ها و درها، به عنوان یک عامل فیزیکی حفاظتی میان محیط‌های داخلی و

خارجی ساختمان عمل می‌کند. طراحی و ساخت این پوشش می‌تواند تأثیر چشمگیری بر پایداری ساختمان ایجاد نماید. یک پوشش ساختمانی با طراحی بهینه، با بهبود عایق و کاهش نشت هوا، به بهبود کارایی انرژی کمک کرده و به کاهش مصرف انرژی منجر شود. این بهبودها می‌توانند منجر به کاهش هزینه‌های مربوط به گرمایش و سرمایش گردد، که نه تنها موجب صرفه‌جویی اقتصادی گردد، بلکه انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی را نیز به حداقل برساند. علاوه بر این، یک پوشش ساختمانی با کارایی بالا توانمند است که با کاهش نشت هوا و به حداقل رساندن نفوذ آلاینده‌های فضای باز، به بهبود کیفیت و راحتی هوای داخل خانه کمک نماید. این موضوع می‌تواند محیط داخلی سالم‌تر و پربارتر برای ساکنان فراهم کند. همچنین، یک پوشش ساختمان پایدار نیز باید با استفاده از مواد سازگار با محیط زیست، از جمله مواد بازیافتی یا تجدیدپذیر، و با در نظر گرفتن طول عمر و دوام مواد مورد استفاده، به‌طور کامل طراحی شود. این اقدام می‌تواند به کاهش ضایعات در طول فرآیند ساخت و ساز و به حداقل رساندن نیاز به تعمیر و نگهداری و جایگزینی در آینده کمک نماید. به طور کلی، پوشش ساختمان با کاهش مصرف انرژی، بهبود کیفیت محیط داخلی و ترویج استفاده از مواد سازگار با محیط زیست، نقش اساسی در پایداری ساختمان ایفا می‌کند (Samarasinghalage, Wijeratne, Yang, & Wakefield, 2022).

از سوی دیگر، رسیدن به اصول پایداری با هدف دستیابی به آسایش حرارتی با استفاده از راه‌حل‌های مقرون به صرفه امری است که مستلزم توجیه و تحقیقات دقیق می‌باشد. در این رویکرد، بهینه‌سازی طراحی ساختمان یک چالش پیچیده است که چندین تابع هدف احتمالی و متغیرهای طراحی متعدد را دربرمی‌گیرددر این راستا، رسیدن به آسایش حرارتی در شرایطی مطرح می‌شود که در آن ساکنان قصد تغییر محیط خود را ندارند (Nematchoua, Tchinda, & Orosa, 2014) و به دنبال راه حل‌های مقرون به صرفه می‌باشند (Mostavi, Asadi, & Boussaa, 2017) و توجه اصلی آنها رسیدن به دمای مطلوب و سلامت محیط است (Nematchoua et al., 2014). علاوه بر این، آسایش حرارتی تأثیر اساسی بر مصرف انرژی ساختمان دارد (Day & Gunderson, 2015).

علاوه بر عوامل محیطی بیرونی و داخلی که تأثیرات چشمگیری بر پایداری ساختمان دارند، عوامل دیگری نیز اثرگذار هستند، از جمله: پوشش ساختمان، راه‌های انتقال حرارت، عناصر ساختمان و خواص مصالح. در کل، طراحی یکپارچه پوسته ساختمان از طریق روش‌های ارزیابی مناسب نقش حیاتی در پایداری ساختمان ایفا می‌کند. همه عواملی که بر نقش پوسته ساختمان تأثیر می‌گذارند، از جمله عملکرد عناصر، فرآیندهای انتقال حرارت و سایر متغیرها، در شکل ۳ نمایان شده‌اند. خط اول دفاع در برابر تأثیرات غیرمطلوب محیطی بر ساختمان و نیز تأثیر ساختمان بر محیط زیست، ایجاب می‌کند که پوشش ساختمان را به صورت پایدار تقویت کرد.. به این ترتیب، برای ۱(IPM) مدل‌های عملکرد یکپارچه ارزیابی عملکرد پایدار پوسته ساختمان توسط محققان مختلف توسعه داده شده است (Iwaro, Mwasha, Williams, & Wilson, 2014).

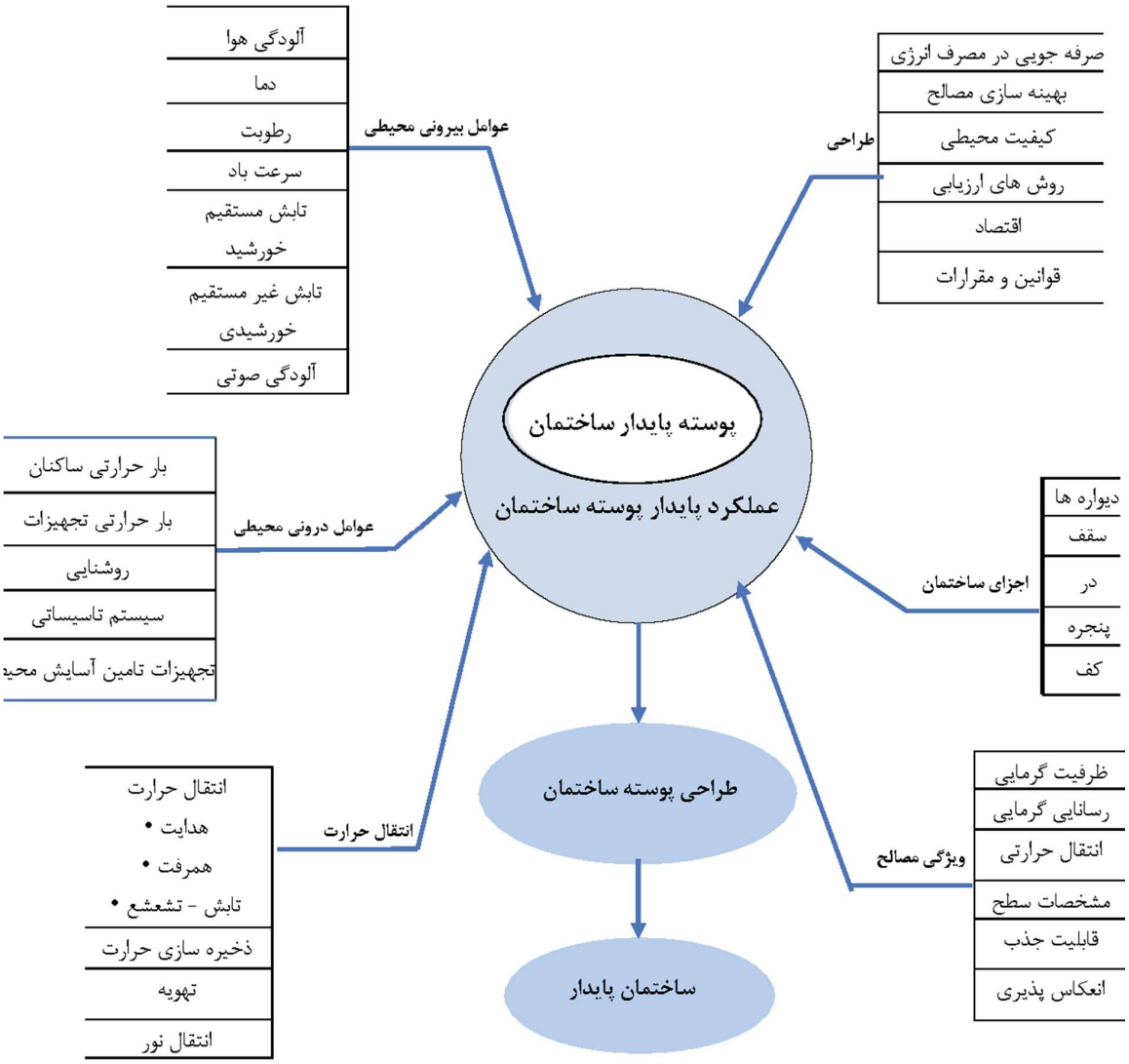
علاوه بر این، درک اهمیت طراحی اجزای ساختمان پایدار، منجر به توسعه بسیاری از روش‌های ارزیابی برای ارزیابی پایداری ساختمان گردیده است.

(Xu, Yu, Yang, Ji, & Zhang, 2018). روش‌های ارزیابی مانند روش‌های ارزیابی عملکرد ساختمان، نقش عمده‌ای در ارزیابی عملکرد پایدار و طراحی ساختمان پایدار دارند. مهمترین آنها شامل روش ارزیابی محیطی تحقیقات ساختمان (BREEAM) است که در سال ۱۹۹۰

1. The Integrated Performance Model

و همچنـان (LEED) بـرای صنعـت سـاختمان و سـاخت و سـاز توسـعه یافـت.

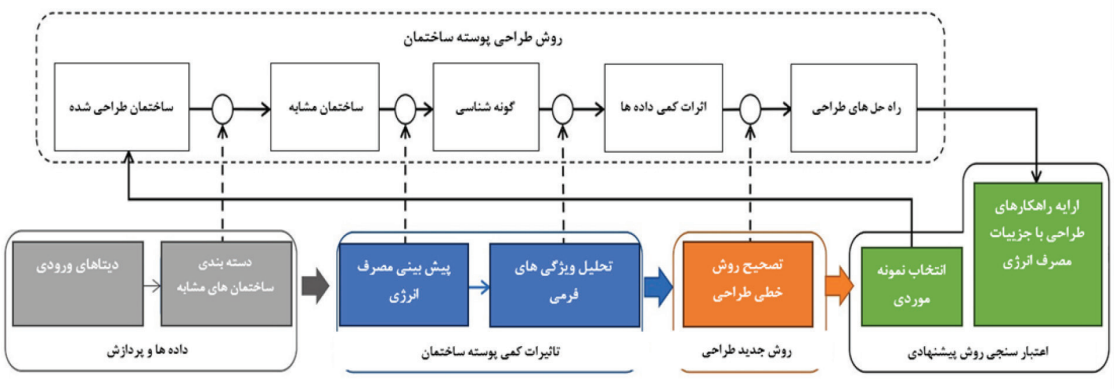
بنابرایـن، مطالعـات بسـیاری در ایـن راسـتا بـا هـدف درک بهتـر و کمـی کـردن تعامـل گسـترده بین آسـایش حرارتـی و عملکـرد انـرژی (Luo, Arens, Zhang, Ghahramani, & Wang, 2018; Zahiri & Elsharkawy, 2018) و همچنیـن بررسـی بهتریـن اقدامـات بـرای بهینه‌سـازی چنیـن تعاملـی انجـام شـده اسـت (Moon & Jung, 2016).



شکل ۳: ارتباط بین پوسته و پایداری ساختمان (Iwaro & Mwasha, 2014)

طراحـی عملکـرد سـاختمان نقـش بسـیار مهمی در کاهـش مصـرف انـرژی سـاختمان‌ها دارد. بـا ایـن حـال، طراحـی مبتنـی بـر شبیه‌سـازی کـه بـه طـور گسـترده‌ای مـورد اسـتفاده قـرار می‌گیـرد، بـا چالش‌هـای متعـددی ماننـد فراینـد مدل‌سـازی و تفـاوت نتایـج بیـن مراحـل شبیه‌سـازی و بهره‌بـرداری مواجـه اسـت.

بـه همیـن دلایـل، طراحـان از روش‌هـای هـوش مصنوعـی بـرای بهبـود کارایـی و قابلیـت طراحـی کارامـد سـاختمان اسـتفاده می‌کننـد (Tian, Shi, & Hong, 2021). شـکل ٤ روش طراحـی پوسـته سـاختمان را بـه کمـک داده‌هـای مختلـف نشـان می‌دهـد. بـر أسـاس ایـن روش دسـته‌بندی سـاختمان‌های مشـابه قـدم اول بـرای ارائـه راهکارهـای مناسـب طراحـی نما می با شـد .



شکل ٤: طراحی داده محور، پوسته ساختمان بر اساس اثرات کمی آنها (Tian et al., 2021)

مرور منابع

روش فعلی در طراحی ساختمان‌های *صفر/کم* انرژی، از جمله پوسته ساختمان و سیستم‌های انرژی، به ندرت عدم قطعیت‌ها را در نظر می‌گیرد یا تقریباً این عدم قطعیت‌ها را با استفاده از عوامل ایمنی در اندازه‌گیری سیستم در نظر می‌گیرد. در واقع، هزینه محاسباتی طراحی بهینه تمامی ساختمان‌های *صفر/کم* انرژی بسیار زیاد است، زیرا گزینه‌ها و پارامترهای طراحی متعددی در آن دخیل هستند و هر گزینه طراحی باید تحت تعداد زیادی از سناریوهای نامشخص ارزیابی شود. بنابراین، نیاز به یک روش کارآمد حاکم بر این تحقیقات است.

لی و وانگ (Li & Wang, 2020) یک روش طراحی بهینه قوی هماهنگ شده برای شناسایی مؤثر راه‌حل‌های طراحی بهینه جهانی برای کل ساختمان‌های *صفر/کم* انرژی تحت عدم قطعیت پیشنهاد کرده‌اند. فرآیند طراحی به دو مرحله تقسیم می‌شود، اول بهینه‌سازی طراحی پوسته‌های ساختمانی و مرحله دوم سیستم‌های انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها. این دو مرحله برای اطمینان از اینکه راه حل طراحی بهینه به دست آمده است، باید به صورت همزمان در نظر گرفته شوند. نتایج مطالعه موردی آنها برای آزمایش و اعتبارسنجی روش پیشنهادی با استفاده از ساختمان کربن صفر نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای شناسایی راه‌حل‌های طراحی بهینه جهانی برای تمامی ساختمان تحت عدم قطعیت‌ها، قوی و کارآمد است که می‌تواند طرح‌هایی با عملکرد بهتر با هزینه کمتر در مقایسه با روش‌های طراحی فعلی ارائه دهد.

مطالعات انجام شده در این زمینه نشان دهنده نیاز به توسعه یک رویکرد جامع و یکپارچه جدید است که می‌تواند عملکرد پایدار پوشش ساختمان را به عنوان گام مهمی در طراحی پوشش پایدار و دستیابی به پایداری ساختمان ارزیابی کند. نمونه مطالعات انجام .

جدول ۱: مرور ادبیات مطالعات پوسته ساختمان نگارندگان

نتایج کلیدی	پارامترهای بهینه شده	هدف بهینه سازی	نویسنده و سال
استفاده از یک روش بهینه سازی به طور قابل توجهی سرعت فرآیند بهینه‌سازی را افزایش خواهد داد.	اندازه و میزان U پنجره، اندازه سیستم سایه‌اندازی	مصرف انرژی	(Al-Homoud, 2005)
مقدار U بهینه برای مصالح دیوار متأثر از جهت گیری‌ها میباشد.	موقعیت و اندازه بازشوی پنجره	آسایش حرارتی فضای داخلی	(Wang, Wong Nyuk, & Li, 2007)
تابعی برای ارتباط حرارت خاص پوسته داخلی ساختمان و دمای فضای داخلی ساخته شد.	حرارت مخصوص پوسته داخلی ساختمان	دمای اتاق	)Jiang, Wang, & Zhang, 2012(

نتایج کلیدی	پارامترهای بهینه شده	هدف بهینه سازی	نویسنده و سال
آنالیز رگرسیون بر اساس روش جست‌وجوی قطعی گرادیان هنوز رویکردی قابل قبول در طراحی ساختمان برای بهینه‌سازی حفظ انرژی بود.	۱۷ پارامتر محبوب طراحی ساختمان	مصرف انرژی	(Asadi, Silva, Antunes, Dias, & Glicksman, 2014)
برای جهت گیری جنوبی، عملکرد حرارتی و بصری به طور قابل توجهی در تضاد نبود، اما در جهت شمال مقادیر بیشترین تضاد را داشتند.	اندازه پنجره، موقعیت مکانی و ویژگی‌های نوری پنجره	مصرف انرژی و آسایش بصری	(Futrell, Ozelkan, & Brentrup, 2015)
یافتن روش‌هایی که نیازی به دانش عمیق در زمینه برنامه‌نویسی کامپیوتر ندارد و از این رو برای معماران مناسب است.	ضخامت مصالح عایق، نوع پنجره، مساحت، جهت‌گیری و سایه‌اندازی.	حداقل بار حرارتی	(Gou, Nik, Scartezzini, Zhao, & Li, 2018)
شمار زیادی از راه حل‌های بهینه ارایه گردید	نوع پنجره، نوع دیوار و مساحت پنجره در دیوار و سقف (بام)	مصرف انرژی سالانه	(Ouarghi & Krarti, 2006)
اگرچه نتایج GA، رفتار تصادفی را نشان داد، اطمینان پذیری نتایج رضایت بخش بود.	نسبت پنجره به دیوار	مصرف انرژی	(Vera, Uribe, Bustamante, & Molina, 2017)
اگرچه تفاوت‌هایی در مصرف انرژی بین اشکال مختلف ساختمان وجود داشت، این انحرافات نهایتا تا ۵٪ بود.	شکل پوسته	مصرف انرژی	(Tuhus-Dubrow & Krarti, 2010)
در زمینه گرمایش ساختمان، ضریب حرارتی پنجره از میان تمام متغیرها به عنوان مهمترین پارامتر مشخص گردید.	مقدار U برای پنجره، دیوار، بام و کف، تهویه، ساکن، دستگاه تنظیم گرما.	مصرف انرژی	(Ioannou & Itard, 2015)
ارائه روش مناسب	اشکال هندسی نواحی سقف	سطح روشنایی	(Rakha & Nassar, 2011)
	موقعیت و اندازه بازشوی پنجره	آسایش حرارتی	(Stavrakakis, Zervas, Sarimveis, & Markatos, 2012)
در وضعیت سطحی مشابه از مصرف انرژی، وضعیت آسایش حرارتی داخلی تغییر قابل ملاحظه‌ای نکرد.	مساحت، جهت‌گیری، ضریب انتقال حرارت دیوار و پنجره	مصرف انرژی و آسایش حرارتی	(Yu, Li, Jia, Zhang, & Wang, 2015)
نتیجه بهینه‌سازی را می‌توان سریعتر و با اطمینان بیشتر بدست آورد.	نسبت پنجره به دیوار، ضخامت دیوار	مصرف انرژی و آسایش حرارتی	(Magnier & Haghighat, 2010)
رویکرد پیشنهادی آنها دقیق‌تر و با صرف زمان کمتر همراه بود.	پارامترهای محبوب طراحی پوسته ساختمان	مصرف انرژی و انتشار سالانه کربن	(Zemella, De March, Borrotti, & Poli, 2011)
در تعدادی زیادی از موارد، حداقل مصرف انرژی سالانه مشابه می‌تواند با چندین پیکربندی مختلف بدست آید.	شکل و اندازه پنجره	مصرف انرژی	(Caldas & Norford, 2002)

پارامترهای پوسته ساختمان

برای درک رفتار اجزای پوشش ساختمان، دسته‌بندی انواع مختلف پوشش ساختمان برای تعریف ترکیبات مناسب برای مکان و اقلیم مورد نیاز است. به طور معمول پوسته ساختمان به دو بخش تقسیم می‌شود:

- پوسته ساختمان نما تک پوست
- پوسته ساختمان نمای دو یا چند پوسته

اجزای مختلف ساختمانی از گذشته تاکنون در سبک‌های مختلف معماری تکامل یافته‌اند و در ساختمان‌های معاصر، از چند لایه مختلف مصالح یا اجزای مختلف استفاده می‌شود که در

مجموع به آن نمای ساختمان اطلاق می‌شود.

پوشش‌های ساختمان به دلایل مختلفی قابل بررسی و تامل می‌باشند که از جمله می‌توان به طراحی ساختمان پایدار، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، آسایش حرارتی و بصری ساختمان اشاره کرد (Kumar & Raheja, 2016).

نماهای تک پوست برای ایجاد حفاظت ساختمان در مقابل محیط اطراف الزامی است. این نوع پوشش ساختمان به سادگی از دیوارهایی (می تواند از آجر، سنگ، بلوک‌های پیش ساخته باشد) با دهانه‌ای هماهنگ با سازه و سقف و تامین روزنه‌هایی برای نورگیری در صورت نیاز تشکیل شده است. در این پوسته‌ها ایجاد لایه‌ای از عایق برای کاهش تقاضای سرمایش در تابستان و گرمایش در زمستان ضروری می‌باشد.

با توجه به این که پژوهش مذکور بر روی نماهای متداول منطقه ۱۵ تهران اجرا شده است، به نماهای دو پوسته توجه نمی‌شود و تنها نماهای تک پوسته مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرند. اجزای نما به طور کلی، مانند جدول زیر، مورد مطالعه و دسته‌بندی قرار می‌گیرند. این پارامترها بر اساس اصول نظری و مرور ادبیات استخراج و دسته‌بندی شده‌اند.

جدول ۲: پارامترهای اجزای مات و شفاف پوشش ساختمان

(Lollini, Barozzi, Fasano, Meroni, & Zinzi, 2006)

اجزای شفاف نمای ساختمان (پنجره‌ها، هواکش‌ها، درها، دیوار شیشه ای، شیشه و غیره)	اجزای مات نمای ساختمان (دیوارها، سقف‌ها، دال‌ها، دیوارهای زیرزمین و درهای مات)
جهت گیری اجزای نما و موانع خارجی	جهت گیری ساختمان، شکل و فاصله از ساختمان‌های اطراف
ابعاد جزء شفاف	موقعیت ساختمان نسبت به ساختمان دیگر
ضریب انتقال حرارت شیشه	پوشش خاک و ماهیت زمین
ضرایب جذب نور و انعکاس سطوح ضریب انتقال شیشه برای نور مستقیم خورشید	ضخامت، چگالی، گرمای ویژه و ضرایب هدایت مواد تخلخل و زبری سطح
ضریب انتقال شیشه برای صدا	ضریب انتقال و جذب صدا از سطح
نوع قاب مورد استفاده برای جزء شفاف	عمق حفره بین لایه‌ها
فاکتور تعمیر و نگهداری لعاب	ضخامت و جذب صدا از مواد عایق مورد استفاده در داخل لایه
خواص حرارتی فصله‌انداز و حفره در سیستم شیشه	نوع ارتباط بین لایه‌های مواد مختلف و تعداد آنها

این پژوهش به بررسی فرم کلی، جهت‌گیری، نسبت شیشه به نما و تراکم می‌پردازد. نتایج به دست آمده از تیپولوژی نما به طراحان کمک خواهد کرد که بر اساس ویژگی‌های فیزیکی نمای ساختمان، در مرحله طراحی اشراف کامل تر بر تأثیرات انتخاب خود در روند پایدارسازی ساختمان از حیث انرژی داشته باشند.

تیپولوژی نماهای منطقه ۱۵

در این مقاله بررسی و طبقه‌بندی بناهای منطقه ۱۵ تهران با رویکرد تیپولوژی منطقه‌ای انجام شده است. برای این منظور پس از مصاحبه با متخصصان شهرداری در نواحی مختلف، در مورد ویژگی‌های منطقه ۱۵ و دسته‌بندی‌های موجود در روند کارهای صدور پروانه، نقشه GIS با لایه بندی قطعه بندی

زمین‌ها، جهت گیری، نسبت طول به عرض، فراوانی قطعه‌ها و مساحت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

در مطالعاتی که تا کنون بر روی موضوع پژوهش حاضر انجام شده است، اغلب شکل‌ها به صورت فرضی و دور از واقعیت انتخاب شده‌اند. به منظور جلوگیری از این موضوع و جلب قابلیت استفاده از نتایج، یکی از بلوک‌های شهر تهران به عنوان محدوده مطالعه انتخاب گردیده است. در میان مناطق مختلف شهر تهران، منطقه ۱۵ به دلایل زیر به عنوان گزینه‌ای مناسب برای بررسی انتخاب شده است:

- دارابودن سابقه سکونت شهری طولانی و ثبیت ساختار شهری.
- قرارگیری در مرکز شهر تهران.
- دارا بودن بافت فرسوده و تمایل ساکنین برای بازسازی.

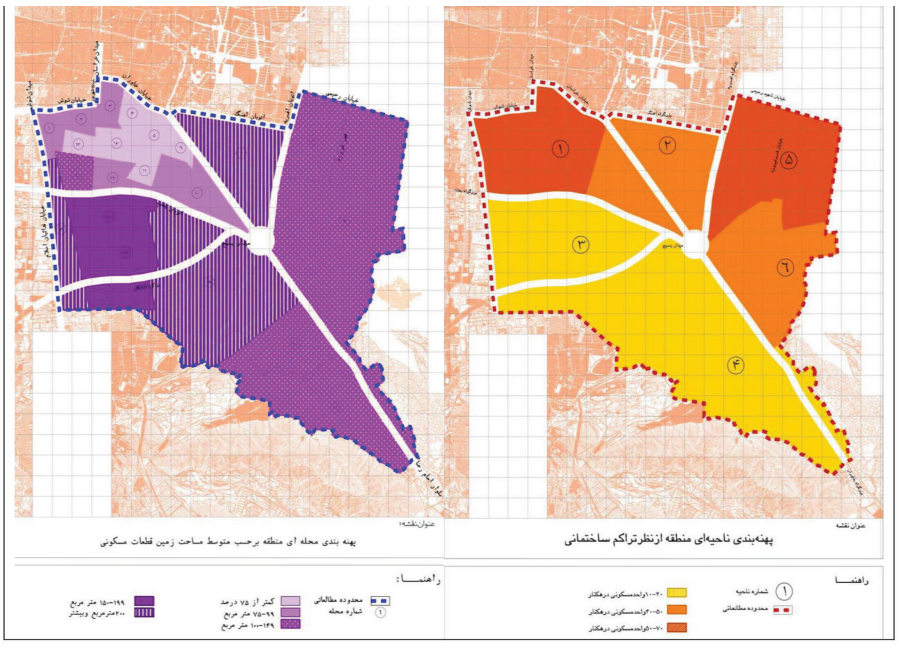
عمده اطلاعات تاریخی از سکونتگاه شهری منطقه پانزده به محله‌های قدیمی این منطقه اعم از شوش- شبیر، مسگرآباد، مشیریه، بهشتیه خاوران یا قبرستان یهودی‌ها، کیانشهر، مسعودیه و خاور شهر بازمی‌گردد.

- منطقه ۱۵ از شمال به پادگان قصر فیروزه، ۴۵ متری آهنگ، خیابان خاوران و شوش شرقی و از غرب به خیابان فدائیان اسلام و از جنوب به خیابان دولت‌آباد، کوه بی‌بی شهربانو و کارخانه سیمان و از شرق به کوه‌های شرقی تهران و حد شرقی اراضی افسریه منتهی می‌شود.

تا سال ۱۴۰۰ جمعیت کلی منطقه پانزده دربرگیرنده بیست و یک محله ۶۵۹۴۶۸ نفر اعلام شده‌است. از این منطقه به عنوان پرجمعیت‌ترین منطقه تهران یاد می‌شود. همچنین ۲۰۹۱۴۱ خانوار در این منطقه زندگی می‌کنند. همچنین تراکم جمعیت منطقه ۱۵ ۲۲۲ نفر در هکتار می‌باشد.

شهرداری منطقه ۱۵ محدوده خدماتی خود را میان ۷ ناحیه تقسیم کرده است (شکل ۵) که محدوده ٦ ناحیه خدمات شهری در داخل محدوده مصوب طرح جامع شهر تهران و محدوده ۱ ناحیه (ناحیه خاورشهر) خارج از این محدوده و داخل محدوده حریم استحفاظی شهر و به صورت منفصل از منطقه قرار دارد. علاوه بر تقسیمات ناحیه های، شهرداری منطقه ۱۵ بر حسب آشنایی با محالت و اوضاع جمعیتی ساکنین و در راستای تشکیل انجمن های شورایاری به ۲۰ محله تقسیم شده است (برگرفته از سایت شهرداری، ۱۴۰۰).

شکل ۵: ناحیه‌های منطقه ۱۵ www.tehran.ir



نتایج به‌دست آمده از GIS منطقه ۱۵

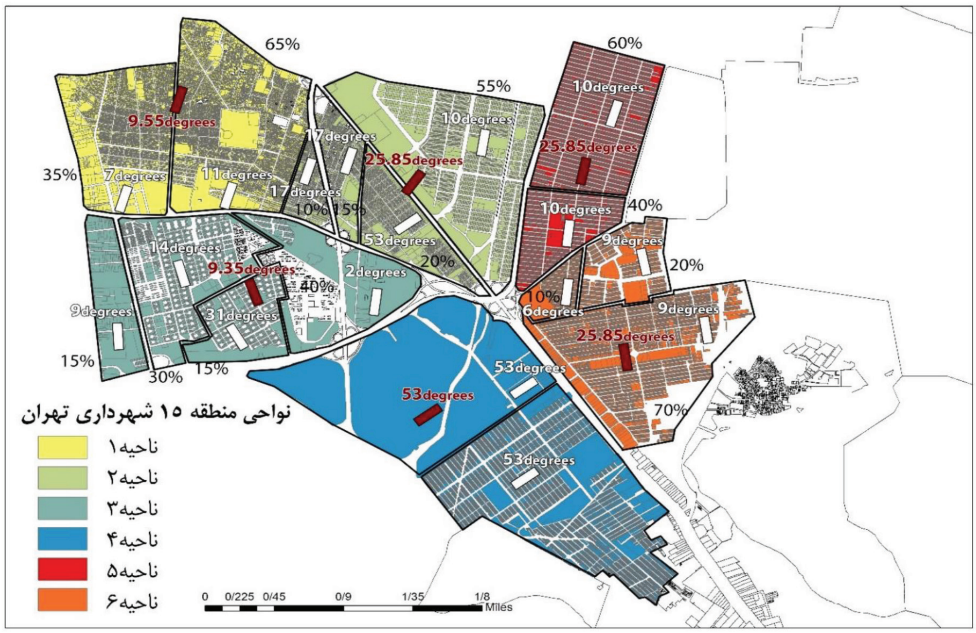
برای به دست آوردن تیپولوژی نماهای مختلف فایل GIS منطقه ۱۵ مورد بررسی و تجزیه و تحلیل دقیق قرار گرفت. برای این منظور در تمامی نواحی نسبت طول به عرض، جهت گیری، میانگین مساحت و فراوانی قطعات در کل منطقه ۱۵ و نواحی مختلف استخراج گردید که در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳: میانگین قطعات در نواحی مختلف نگارندگان

ناحیه	میانگین مساحت	جهت گیری (شمالی جنوبی عقربه ساعت)	نسبت طول به عرض	میانگین مسکونی	فراوانی قطعات
۱	۱۲۸/۶۳	۹/۵۵	۲/۲	۷۳/۵	۵۵
۲	۲۴۵/۰۴	۲۵/۸۵	۲/۴	۱۴۴	۹۸
۳	۵۵۰/۷۹	-۹/۳۵	۱/۶	۲۳۸/۴	۱۰۷
۴	۴۸۴/۲۷	۵۳	۲/۸	۱۳۵/۵	۱۱۸
۵	۱۳۸/۸۸	۱۱/۴	۳/۱	۱۲۳/۲	۱۲۲
۶	۱۸۷/۹۱	-۷/۵	۳/۳	۱۲۵/۵	۱۲۲

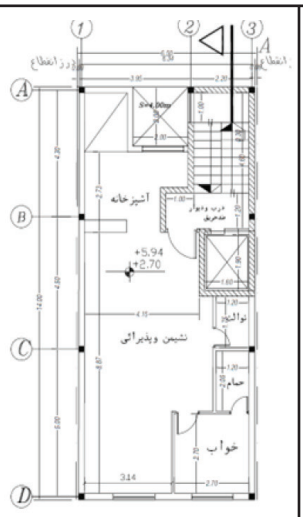
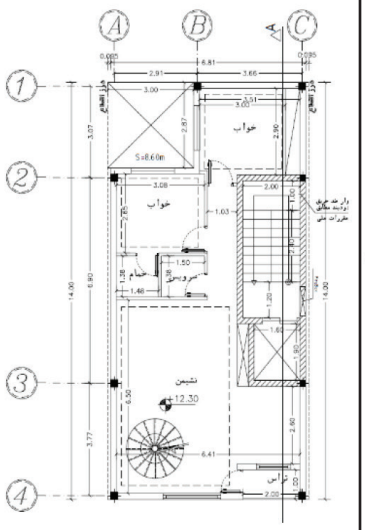
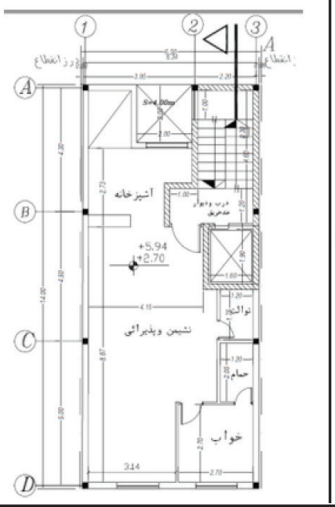
همان گونه که در جدول۳ دیده می‌شود بیشترین فراوانی قطعات مربوط به نواحی ۵ و ۶ می‌باشد که عموما مساحت آنها ۱۲۰ متر مربع می‌باشد. قطعات با این متراژ دارای نمای ۶ متری هستند که جز نماهای بسیار متداول در این منطقه است و حجم زیادی از طرح‌های این منطقه را شامل می‌شود. بزرگترین قطعات مربوط به ناحیه ۳ بوده و کشیدگی کمتری را نسبت به بقیه مناطق دارا می‌باشند. جهت گیری‌ها از جنوب شرقی تا جنوب غربی در نواحی مختلف متفاوت است.

شکل ۶: بررسی فایل GIS منطقه ۱۵



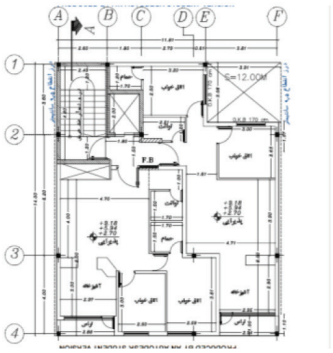
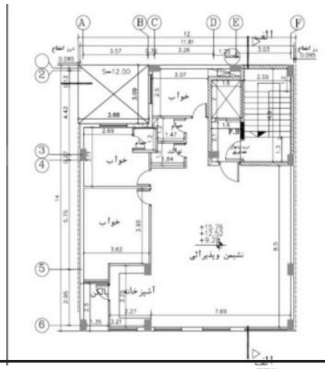
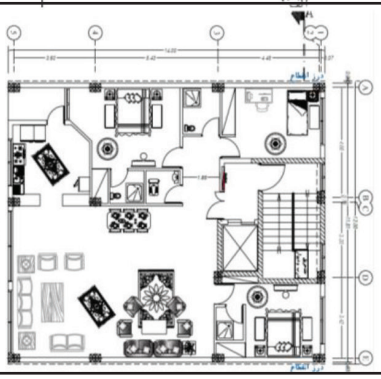
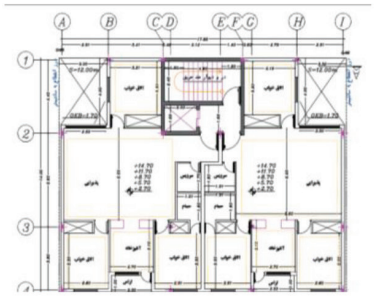
پلان‌های متداول با نمای ۶ متری که قطعات ۱۲۰ متری منطقه هستند، دارای فضا بندی به صورت ۳ تیپ مختلف هستند که بنا به خواست کارفرما و طراحی معمار اجرا می‌شوند. در این قطعه بندی‌ها در تیپ ۱ یک اتاق خواب و پذیرایی در نمای جنوبی قرار دارند. در تیپ ۲ آشپزخانه و نشیمن و در تیپ ۳ دو اتاق خواب در ضلع جنوب قرار می‌گیرند. در تیپ ۲ عموما تراس در سمت آشپزخانه قرار می‌گیرد.

جدول ٤ : نماهای ٦ متری منطقه ١٥

نمای ٦ متری (تیپ ١)		
نمای ٦ متری (تیپ ٢)		
نمای ٦ متری (تیپ ٣)		

نماهـای در قطعـات بـزرگ تـر عمومـا دارای ابعـاد ١٢، ١٤، ١٦، ١٨ متـری می‌باشـند کـه طراحـی آنهـا بـر اسـا پلان‌هـای مـورد تاییـد کارفرمـا تهیـه می‌شـود ولیکـن دارای نسـبت سـطوح نـور گـذر و غیـر شـفاف آنهـا بسـیار نزدیـک به هـم و بـا مصالح مشـابه و متـداول منطقـه اجـرا می‌شـوند. درصـد شیشـه بـه دیـوار بیـن ٤٠ تـا ٥٠ درصـد و مصالـح به کار رفتـه در اغلـب نماهـا سـنگ و آجـر می‌باشـد.

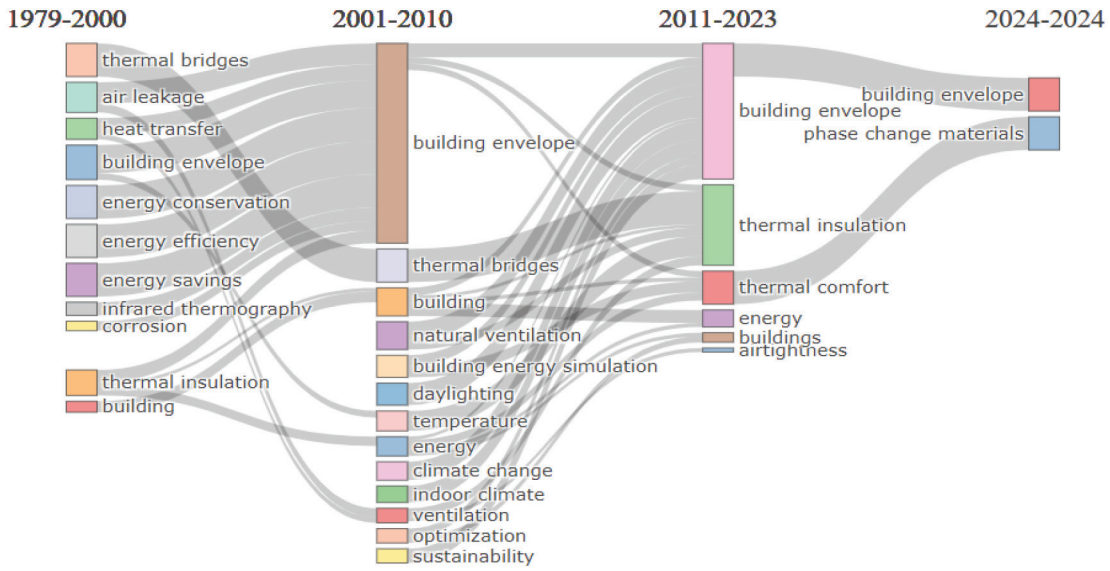
جدول ۵ : سایر نماهای متداول منطقه ۱۵

نمای ۱۲ متری (تیپ۱)		
نمای ۱۲ متری (تیپ۲)		
نمای ۱٤ متری		
نمای ۱۸ متری		

نتیجه‌گیری

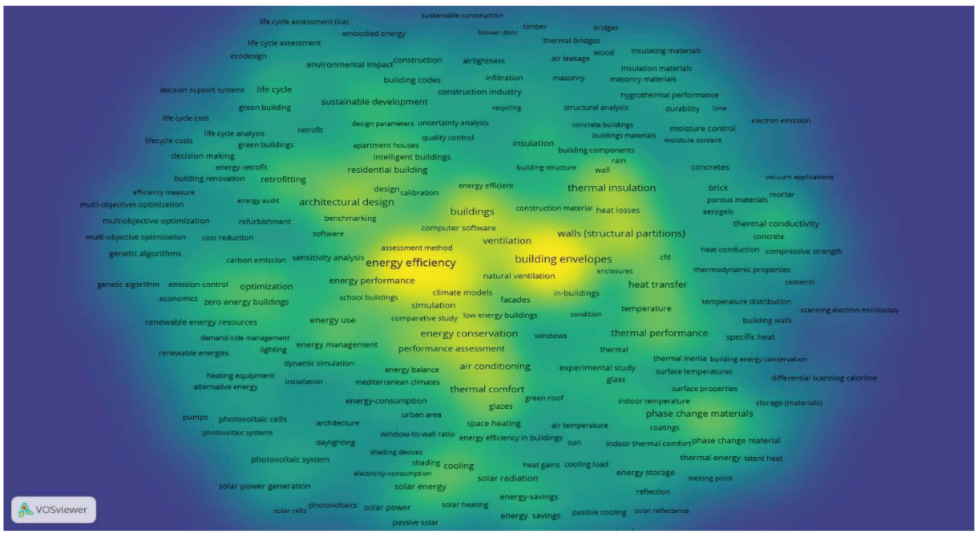
رسیدن به اهداف پایداری با تأمین آسایش حرارتی و استفاده از راه‌حل‌های مقرون به‌صرفه، یک چالش پیچیده است که نیازمند بهینه‌سازی طراحی ساختمان با چندین تابع هدف و متغیر طراحی می‌باشد. این بهینه‌سازی می‌تواند به وسیله رویکردهای مختلف، از جمله نمونه‌برداری از فضای طراحی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی جستجو، و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور کاهش مصرف انرژی ساختمان صورت گیرد.

در این مقاله، مطالعات موجود در حوزه بهینه سازی پوسته ساختمان در جهت کاهش مصرف انرژی مورد بررسی و مرور سیستماتیک قرار گرفت. برای اولین بار در سال ۱۹۷۹ میلادی پوسته ساختمان به عنوان بخش تأثیر گزار بر رفتار حرارتی ساختمان مورد توجه قرار گرفت (شکل ۷). همانگونه که مشاهده می‌شود از سال ۲۰۱۰ میلادی به صورت جدی تر این موضوع مورد بررسی قرار گرفت و در سال‌های اخیر با تاکید بر مصالح ادامه دارد.



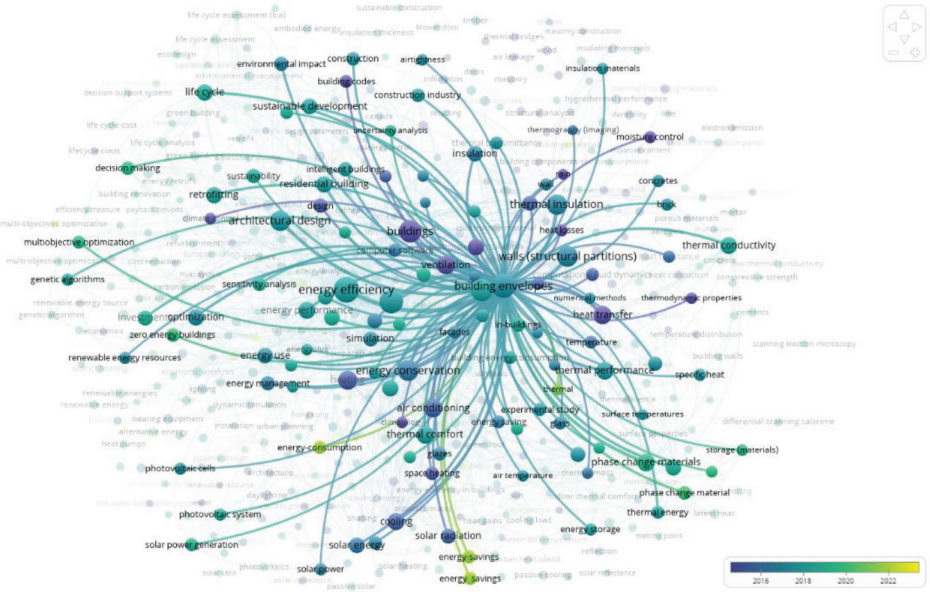
شکل ۷: فراوانی کلید واژه‌های بررسی شده در ارتباط با رفتار حرارتی پوسته ساختمان بر اساس سال به کمک اسکوپوس

همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، موضوعات مورد مطالعه در ارتباط با پوسته ساختمان، بیشتر پیرامون مصرف انرژی، عایق حرارتی، طراحی ساختمان، انرژی خورشیدی و ساختمان‌های مسکونی انجام شده و همانگونه که در تصویر مشاهده میشود، جنس جداره‌ها و نوع شیشه کمتر از بقیه موارد مورد بررسی قرار گرفته‌اند و پیشنهاد می‌شود و برای مطالعات آینده این موضوعات بررسی شوند.



شکل ۸: فراوانی موضوعات بررسی شده در ارتباط با رفتار حرارتی پوسته ساختمان

شکل ۹ موضوعات بررسی شده در ارتباط با پوسته ساختمان در سالهای مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود موضوعات مربوط به مصرف انرژی در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند و نشان دهنده جدید بودن موضوع می‌باشد.



شکل ۹: نو بودن موضوعات بررسی شده در ارتباط با پوسته ساختمان

برای بهینه‌سازی حرارتی نماهای ساختمان، انتخاب نمونه‌های متفاوت و تعیین تیپ‌ها در بسترهای مختلف اجتناب ناپذیر است. این تحلیل‌ها و راهکارها باید بر اساس شرایط واقعی انجام شوند و نیازمند بررسی ویژگی‌های معماری مانند شیشه، مصالح، و نسبت فضاهای پر و خالی است.

در این سناریو، تفاوت در رویکردهای بهینه‌سازی ناشی از تنوع در نمونه‌ها و تیپ‌های مختلف در محیط‌های مختلف برای تحلیل رفتار حرارتی پوسته ساختمان مطرح می‌شود. برای مثال، نماهای متداول در منطقه ۱۵ تهران به صورت کامل مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا بستر مطالعات مرتبط با رفتار حرارتی پوسته فراهم شود.بر اساس مطالعات اجرا شده، نماهای منطقه به گونه‌ای بر اساس طول به نماهای ٦، ۱۲، ١٤ و ۱۸ متری تقسیم‌بندی شده‌اند. بیشترین فراوانی نماها در نواحی ۵ و ٦ وجود دارد که معمولاً دارای مساحت ۱۲۰ مترمربع هستند. دسته‌بندی‌ها بر اساس فراوانی قطعات و نقشه‌ها صورت گرفته است.

مطالعات آینده باید به بررسی پارامترهای نما و تأثیر آنها بر رفتار حرارتی معطوف شوند. ویژگی‌های معماری مانند شیشه، مصالح، و نسبت فضاهای پر و خالی نیز مورد بررسی قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود که این روش مطالعاتی به دیگر مناطق شهری نیز گسترش یابد و نتایج با استفاده از رویکردهای علمی در کمیته نما مورد داوری قرار گیرد.

منابع

Al-Homoud, M. S. (2005) A Systematic Approach for the Thermal Design Optimization of Building Envelopes. Journal of Building Physics, 29(2), 95-119. doi:10.1177/1744259105056267.

Anastaselos, D., Oxizidis, S., & Papadopoulos, A. M. (2011) Energy, environmental and economic optimization of thermal insulation solutions by means of an integrated decision support system. Energy and Buildings, 43(2), 686–694. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.013.

Asadi, E., Silva, M. G. D., Antunes, C. H., Dias, L., & Glicksman, L. (2014) Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application. Energy and Buildings, 81, 444–456. doi:10.1016/j.enbuild.2014.06.009.

Bojić, M., Miletić, M., & Bojić, L. (2014) Optimization of thermal insulation to achieve energy savings in low energy house (refurbishment). Energy Conversion and Management, 84, 681–690. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.095.

Bolattürk, A. (2006) Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey. Applied Thermal Engineering, 26(11), 1301–1309. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.10.019.

Caldas, L. G., & Norford, L. K. (2002) A design optimization tool based on a genetic algorithm. Automation in Construction, 11(2), 173–184. doi:https://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00096-0.

Çomaklı, K., & Yüksel, B. (2004) Environmental impact of thermal insulation thickness in buildings. Applied Thermal Engineering, 24(5), 933–940. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.10.020.

Cronshaw, I. (2015) World Energy Outlook 2014 projections to 2040: natural gas and coal trade, and the role of China. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 59(4), 571–585. doi:https://doi.org/10.1111/1467-8489.12120.

Cvetković, D., & Bojić, M. (2014) Optimization of thermal insulation of a house heated by using radiant panels. Energy and Buildings, 85, 329–336. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.043.

Day, J. K., & Gunderson, D. E. (2015) Understanding high performance buildings: The link between occupant knowledge of passive design systems, corresponding behaviors, occupant comfort and environmental satisfaction. Building and Environment, 84, 114–124. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.003.

Futrell, B. J., Ozelkan, E. C., & Brentrup, D. (2015) Bi-objective optimization of building enclosure design for thermal and lighting performance. Building and Environment, 92, 591–602. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.039.

Gero, J. S., D'Cruz, N., & Radford, A. D. (1983) Energy in context: A multicriteria model for building design. Building and Environment, 18(3), 99–107. doi:https://doi.org/10.1016/0360-1323(83)90001-X.

González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Maestre, I. R., & Yan, D. (2022) A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. Energy Reports, 8, 626–637. doi:https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.280.

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. doi:1/0.1016j.enbuild.2017.09.095.

International Journal of Sustainable Engineering, 8, 1-23. doi:10.1080/19397038.2014.930211.

Jiang, F., Wang, X., & Zhang, Y. (2012) Analytical optimization of specific heat of building internal envelope. Energy Conversion and Management, 63, 239-244. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.01.038.

Kaynakli, O. (2012). A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), 415-425. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.006.

Kumar, G., & Raheja, G. (2016) Design Determinants of Building Envelope for Sustainable Built Environment: A Review.

Lee, J. W., Jung, H. J., Park, J. Y., Lee, J. B., & Yoon, Y. (2013) Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. Renewable Energy, 50, 522-531. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.029.

Li, H., & Wang, S. (2020) Coordinated robust optimal design of building envelope and energy systems for zero/low energy buildings considering uncertainties. Applied Energy, 265, 114779. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114779.

Lollini, R., Barozzi, B., Fasano, G., Meroni, I., & Zinzi, M. (2006) Optimisation of opaque components of the building envelope. Energy, economic and environmental issues. Building and Environment, 1001-1013.

Lulic, H., Civic, A., Pasic, M., Omerspahic, A., & Dzaferovic, E. (2014) Optimization of Thermal Insulation and Regression Analysis of Fuel Consumption. Procedia Engineering, 69, 902-910. doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.069.

Hafez, F.S., Sa'di, B., Safa-Gamal, M., Taufiq-Yap, Y.H., Alrifaey, M., Seyedmahmoudian, M.,. . . Mekhilef, S. (2023) Energy Efficiency in Sustainable Buildings: A Systematic Review with Taxonomy, Challenges, Motivations, Methodological Aspects, Recommendations, and Pathways for Future Research. Energy Strategy Reviews, 45, 101013. doi:https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101013.

Hasan, A. (1999) Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost. Applied Energy, 63(2), 115-124. doi:https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99) 00023-9.

Heiselberg, P., Brohus, H., Hesselholt, A., Rasmussen, H., Seinre, E., & Thomas, S. (2009) Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings. Renewable Energy, 3. 2030-2036, (9), doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.016.

Huang, J., Lv, H., Gao, T., Feng, W., Chen, Y., & Zhou, T. (2014) Thermal properties optimization of envelope in energy-saving renovation of existing public buildings. Energy and Buildings, 75, 504-510. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.040.

Ioannou, A., & Itard, L. (2015) Energy Performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy. Energy and Buildings, 92. doi:10.1016/j.enbuild.2015.01.055.

Iwaro, J., & Mwasha, A. (2014) The Impact of Sustainable Building Envelope Design on Building Sustainability Using Integrated Performance Model. International Journal of Sustainable Built Environment, 2. doi:10.1016/j.ijsbe.2014.03.002.

Iwaro, J., Mwasha, A., Williams, R., & Wilson, W. (2014) The role of integrated performance model in sustainable envelope design and assessment.

economic optimization of external wall thermal insulation thickness. Energy and Buildings, 86, 268-274. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.023.

Oliveira, A. C., & de Oliveira Fernandes, E. (1992) A new simplified method for evaluating the thermal behaviour of direct gain passive solar buildings. Solar Energy, 48(4), 227-233. doi:https://doi.org/10.1016/0038-092X(92)90095-R.

Ouarghi, R., & Krarti, M. (2006) Building shape optimization using neural network and genetic algorithm approach, Chicago, IL.

Ozel, M. (2011) Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials. Applied Thermal Engineering, 31(17), 3854-3863. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.07.033.

Ozel, M. (2014) Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness. Energy and Buildings, 72, 288-295. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.015.

Pé rez-Lombard, L., Ortiz, J., & Velázquez, D. (2013) Revisiting energy efficiency fundamentals. Energy Efficiency, 6(2), 239-254. doi:10.1007/s12053-012-9180-8.

Rakha, T., & Nassar, K. (2011). Genetic algorithms for ceiling form optimization in response to daylight levels. Renewable Energy, 36(9), 2348-2356. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.006.

Roberts, B. C., Webber, M. E., & Ezekoye, O. A. (2015) Development of a multi-objective optimization tool for selecting thermal insulation materials in sustainable designs. Energy and Buildings, 105, 358-367. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.063.

Luo, M., Arens, E., Zhang, H., Ghahramani, A., & Wang, Z (2018)) Thermal comfort evaluated for combinations of energy-efficient personal heating and cooling devices. Building and Environment, 143, 206-216. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.008.

Magnier, L., & Haghighat, F. (2010) Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. Building and Environment, 45(3), 739-746. doi:10.1016/j.buildenv.2009.08.016.

Monsen, W. A., Klein, S. A., & Beckman, W. A. (1981) Prediction of direct gain solar heating sytem performance. Solar Energy, 27(2), 143-147. doi:https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90036-0.

Moon, J. W., & Jung, S. K. (2016) Development of a thermal control algorithm using artificial neural network models for improved thermal comfort and energy efficiency in accommodation buildings. Applied Thermal Engineering, 103, 1135-1144. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.002.

Mostavi, E., Asadi, S., & Boussaa, D. (2017) Development of a new methodology to optimize building life cycle cost, environmental impacts, and occupant satisfaction. Energy, 121, 606-615. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.049.

Nematchoua, M. K., Tchinda, R., & Orosa, J. A. (2014) Thermal comfort and energy consumption in modern versus traditional buildings in Cameroon: A questionnaire-based statistical study. Applied Energy, 114, 687-699.

Nyers, J., Kajtar, L., Tomić, S., & Nyers, A. (2015) Investment-savings method for energy-

buildings in Singapore. Energy and Buildings, 39(8), 954-961. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.011.

Whillier, A. (19).53. Solar energy collection and its utilization for house heating.

Xu, S., Yu, Z., Yang, C., Ji, X., & Zhang, K. (2018) Trends in evapotranspiration and their responses to climate change and vegetation greening over the upper reaches of the Yellow River Basin. Agricultural and Forest Meteorology, 263, 118-129. doi:https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.08.010.

Yu, W., Li, B., Jia, H., Zhang, M., & Wang, D. (2015) Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. Energy and Buildings, 88, 135-143. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.063.

Zahiri, S., & Elsharkawy, H. (2018) Towards energy-efficient retrofit of council housing in London: Assessing the impact of occupancy and energy-use patterns on building performance. Energy and Buildings, 174, 672-681. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.010.

Zemella, G., De March, D., Borrotti, M., & Poli, I. (2011) Optimised design of energy efficient building façades via Evolutionary Neural Networks. Energy and Buildings, 43(12), 3297-3302. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.006.

Samarasinghalage, T. I., Wijeratne, W. M. P. U., Yang, R. J., & Wakefield, R. (2022) A multi-objective optimization framework for building-integrated PV envelope design balancing energy and cost. Journal of Cleaner Production, 342, 13.0930 doi:10.1016/j.jclepro.2022.130930.

Stavrakakis, G. M., Zervas, P. L., Sarimveis, H., & Markatos, N. C. (2012). Optimization of window-openings design for thermal comfort in naturally ventilated buildings. Applied Mathematical Modelling, 36(1), 193-211. doi:https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.05.052.

Tian, Z., Shi, X., & Hong, S.-M. (2021). Exploring data-driven building energy-efficient design of envelopes based on their quantified impacts. Journal of Building Engineering, 42, 103018. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103018.

Tuhus-Dubrow, D., & Krarti, M. (2010) Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. Building and Environment, 45(7), 1574-1581. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.005.

Vera, S., Uribe, D., Bustamante, W., & Molina, G. (2017) Optimization of a fixed exterior complex fenestration system considering visual comfort and energy performance criteria. Building and Environment, 113, 163-174. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.027.

Wang, L., Wong Nyuk, H., & Li, S. (2007) Facade design optimization for naturally ventilated residential