

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

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

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

نوع مقاله: پژوهشی - ۱۱۳-۱۳۱

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 مرور 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.

r.salimi1402@gmail.com

*دانشجوی دکتری معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

S_m_mofidi@iust.ac.ir

**نویسنده مسئول: استادیار گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

Sanayeyan@iust.ac.ir

*** استادیار گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران



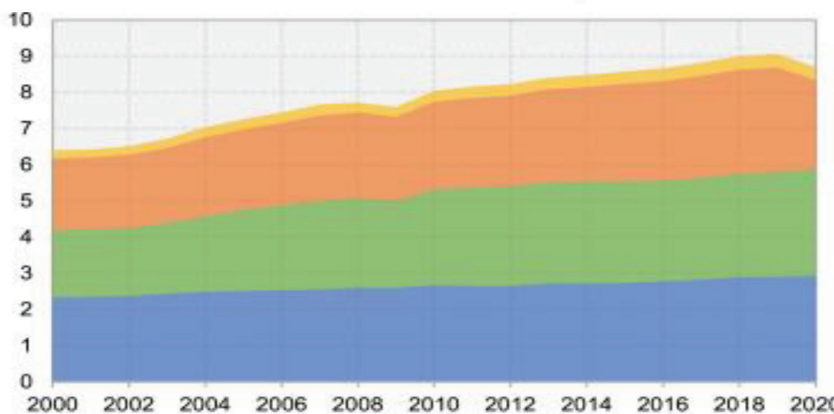
مقدمه

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 پایان پذیر بودن منابع فسیلی و اثرات زیست محیطی ناشی از سوزاندن این منابع ضرورت صرفه جویی در مصرف انرژی با بهینه سازی مصرف آن و نیز جایگزینی منابع دیگر انرژی بخصوص انرژی های تجدیدپذیر را آشکار نموده است (González-Torres, Pérez, 2022; Lombard, Coronel, Maestre, & Yan, 2022).

آژانس بین المللی انرژی اعلام کرده است که تا سال ۲۰۲۵، منابع نفت دنیا به پایان می رسد و پس از این زمان، قیمت نفت افزایش قابل توجهی پیدا می کند (Cronshaw, 2015). در نتیجه لازم است استفاده از منابع انرژی های طبیعی بیش از پیش مورد توجه قرار گیرند. در سال های اخیر تلاش های چشمگیری برای بهبود بهره وری و کاهش مصرف انرژی انجام شده است. مفهوم بهره وری انرژی در ساختمان ها، مربوط به تأمین انرژی مورد نیاز برای دستیابی به شرایط محیطی مطلوب و کاهش حداکثری مصرف انرژی است. سیاست های مدیریت انرژی تلاش کرده اند تا با مسائل مربوط به انرژی در سراسر جهان سر و کار داشته باشند. این مسائل عبارتند از محدودیت های انرژی، از قبیل بحران کمبود

سوخت، مسایل زیست محیطی، تغییرات آب و هوا. ... در این راستا طرح های بلند مدت و کوتاه مدت مطابق با چارچوب پایداری توسط نهادهای مرتبط پیشنهاد شده اند (Hafez et al., 2023; Pérez, 2022; Lombard, Ortiz, & Velázquez, 2013).

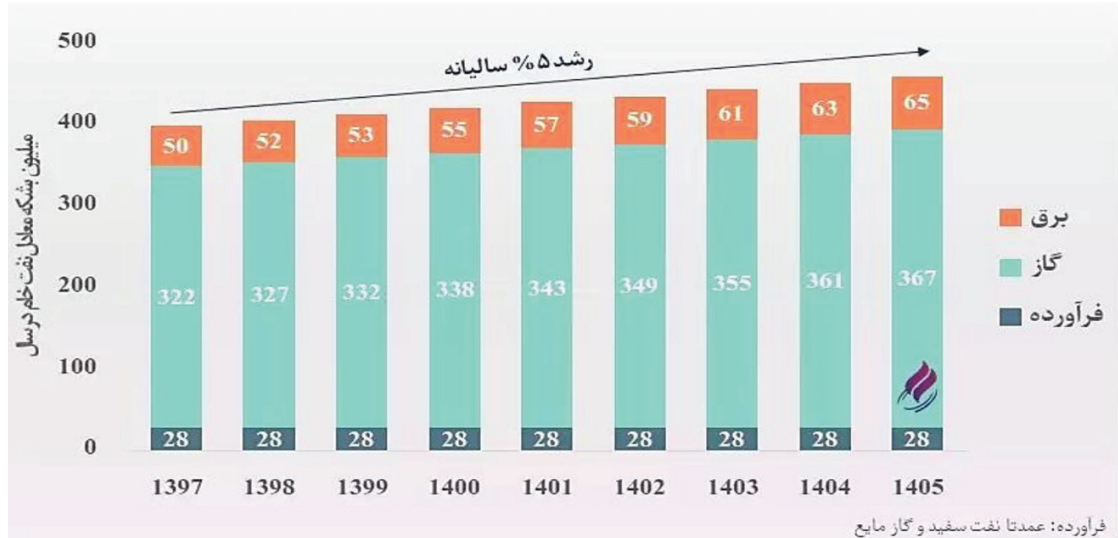
مصرف انرژی در بخش مسکونی به میزان انرژی مصرفی خانوارها در خانه هایشان اشاره دارد. این انرژی معمولاً برای گرمایش، سرمایش، روشنایی، الکترونیک، لوازم خانگی و سایر فعالیت های خانگی استفاده می شود. بر اساس گزارش اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده، بخش مسکونی حدود ۲۰ درصد از کل مصرف انرژی را در سال ۲۰۲۰ به خود اختصاص داده است (شکل ۱). 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 می تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند اندازه و قدمت خانه ها، کارایی وسایل و مصالح ساختمانی و رفتار کاربر و انتخاب سبک زندگی باشد. از آنجایی که نگرانی ها در مورد تغییرات آب و هوا و امنیت انرژی همچنان افزایش می یابد، علاقه فزاینده ای به ترویج اقدامات صرفه جویی 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)

مصرف سالانه با رشد متوسط ۵ درصدی مواجه خواهد بود. در ۰ روند رشد تقاضای انرژی در بخش خانگی به تفکیک هر یک از حامل‌های انرژی اشاره شده است. همان‌طور که مشخص است، این بخش مصرف سالانه با رشد متوسط ۵ درصدی مواجه خواهد بود (1402، vcmstudy.ir).

ایران هر ساله با کمبود عرضه گاز طبیعی در فصل زمستان مواجه است و این‌گونه به نظر می‌رسد که تنها راهکار برای مواجهه با این مشکل یافتن راهی در جهت کاهش میزان مصرف گاز طبیعی است. در شکل ۲ روند رشد تقاضای انرژی در بخش خانگی به تفکیک هر یک از حامل‌های انرژی اشاره شده است. همان‌طور که مشخص است، این بخش



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

اشاره می‌شود:

شکل ساختمان:

شکل هندسی ساختمان می‌تواند تأثیر زیادی بر تابش حرارتی و تعادل حرارتی داشته باشد. ساختمان‌های با شکل‌های هندسی مناسب، مانند طراحی‌های با فرم‌های مستطیلی یا مربعی که نسبت سطح به حجم مناسبی دارند، می‌توانند انتقال حرارت را بهبود بخشیده و مصرف انرژی را کاهش دهند.

نسبت طول به عرض:

نسبت طول به عرض ساختمان نقش اساسی در تابش حرارتی و انتقال حرارت از سطح خارجی به داخل دارد. با توجه به شرایط محیطی و عملکرد بنا، تعیین نسبت مناسب می‌تواند به بهینه‌سازی رفتار حرارتی ساختمان و کاهش مصرف انرژی کمک کند.

به این ترتیب، آگاهی روز افزون در مورد انرژی و منابع مصرفی، باعث ایجاد حرکتی به سوی طراحی معماری انرژی کارا گردیده است. این حرکت به منظور ایجاد ساختمان‌های مطلوب‌تر با مصرف انرژی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. عملکرد حرارتی ساختمان‌ها به طور کلی تحت تأثیر سه عامل اصلی قرار دارد: خصوصیات اقلیمی منطقه، ویژگی‌های فیزیکی ساختمان، و تأمین آسایش حرارتی مورد نیاز در داخل ساختمان (Gero, D'Cruz, & Radford, 1983). در این میان، فیزیک ساختمان با تأکید بر پارامترهای پوسته بنا، می‌تواند تا حد قابل توجهی بر عملکرد انرژی و آسایش حرارتی ساختمان تأثیر بگذارد. به طور قطع پارامترهای هندسی ساختمان از اهمیت بسزایی برای بهینه‌سازی رفتار حرارتی آن برخوردارند. در زیر به برخی از این پارامترها

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 مسکن 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 می‌گذارد. 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 تأثیرگذار 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; Bolattürk, 2006; Çomaklı & Yüksel, 2004; Cvetković & Bojić, 2014; Hasan, 1999; Huang et al., 2014; Kaynaklı, 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

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 (IPM) مدل‌های عملکرد یکپارچه ارزیابی عملکرد پایدار پوسته ساختمان توسط (Iwano, 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.

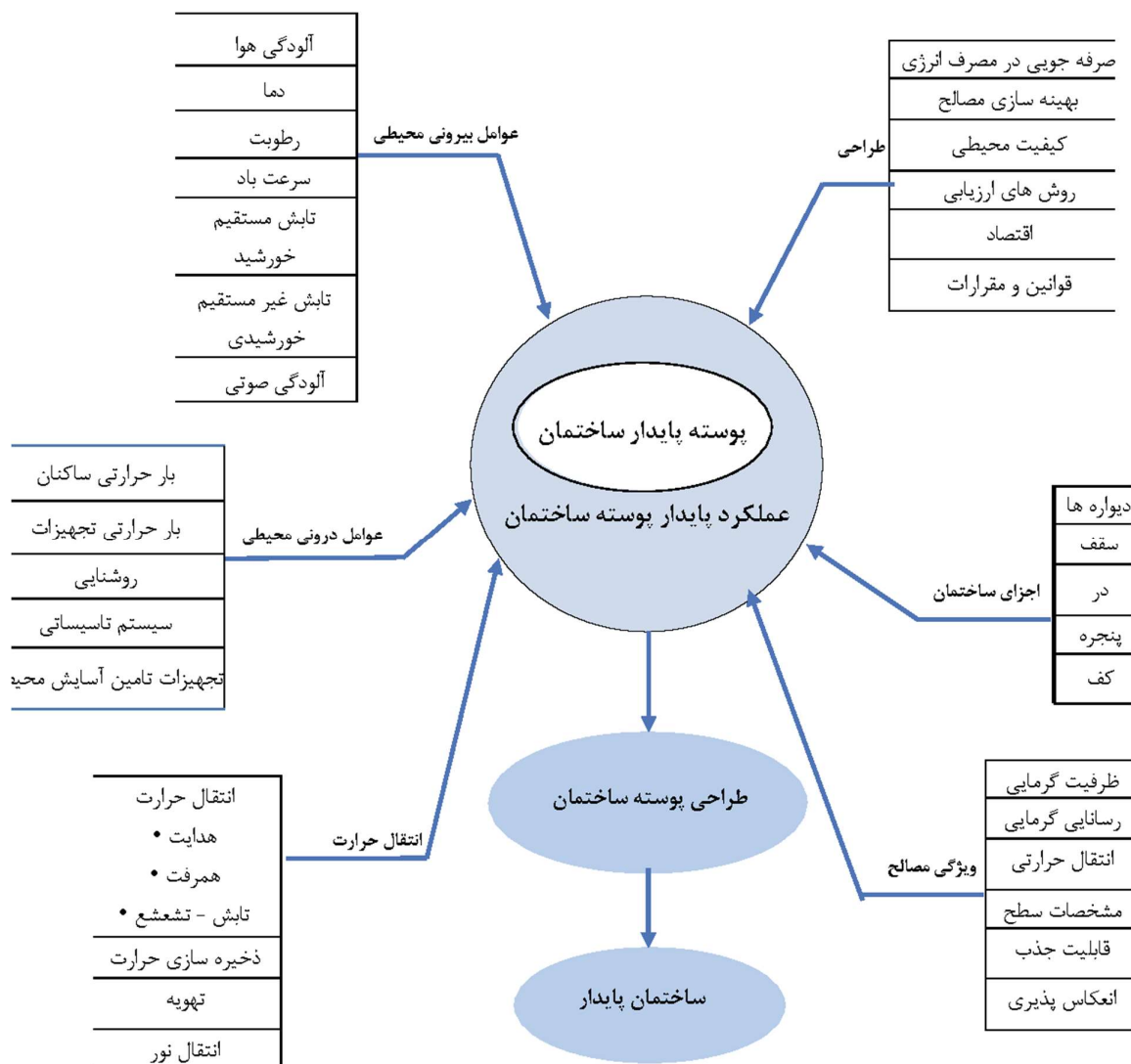
(Xu, Yu, Yang, Ji, & Zhang, 2018). روش‌های ارزیابی مانند روش‌های ارزیابی عملکرد ساختمان، نقش عمده‌ای در ارزیابی عملکرد پایدار و طراحی ساختمان پایدار دارند. مهمترین آنها شامل روش ارزیابی محیطی تحقیقات ساختمان (BREEAM) است که در سال ۱۹۹۰

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 می‌تواند 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، به طور 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 توجه و تحقیقات دقیق می‌باشد. در این رویکرد، بهینه‌سازی طراحی ساختمان یک چالش پیچیده است که چندین تابع هدف احتمالی و متغیرهای طراحی متعدد را دربرمی‌گیرد در این راستا، رسیدن به آسایش

Zhang, Ghahramani, & Wang, 2018; Zahiri & Elsharkawy, 2018) و همچنین بررسی بهترین اقدامات برای بهینه‌سازی چنین تعاملی انجام شده است (Moon & Jung, 2016).

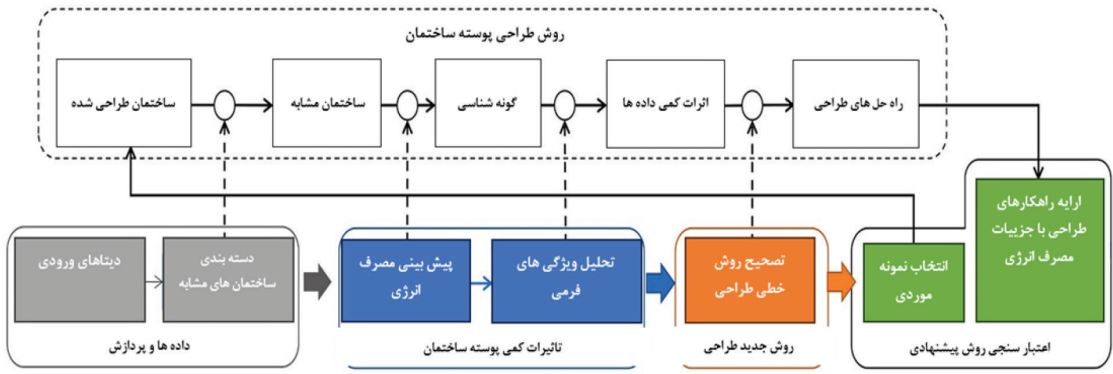
و همچنین (LEED) برای صنعت ساختمان و ساخت و ساز توسعه یافت. بنابراین، مطالعات بسیاری در این راستا با هدف درک بهتر و کمی کردن تعامل گسترده بین آسایش حرارتی و عملکرد انرژی (Luo, Arens, 2016).



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

مصنوعی برای بهبود کارایی و قابلیت طراحی کارآمد ساختمان استفاده می کنند (Tian, Shi, & Hong, 2021). شکل ۴ روش طراحی پوسته ساختمان را به کمک داده های مختلف نشان می دهد. بر اساس این روش دسته بندی ساختمان های مشابه قدم اول برای ارائه راهکارهای مناسب طراحی نما می باشد.

طراحی عملکرد ساختمان نقش بسیار مهمی در کاهش مصرف انرژی ساختمان ها دارد. با این حال، طراحی مبتنی بر شبیه سازی که به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرد، با چالش های متعددی مانند فرایند مدل سازی و تفاوت نتایج بین مراحل شبیه سازی و بهره برداری مواجه است. به همین دلایل، طراحان از روش های هوش



شکل ۴: 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

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

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

پارامترهای پوسته ساختمان

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

- پوسته ساختمان نما تک پوست
 - پوسته ساختمان نمای دو یا چند پوسته
- اجزای مختلف ساختمانی از گذشته تاکنون در سبک های مختلف معماری تکامل یافته اند و در ساختمان های معاصر، از چند لایه مختلف مصالح یا اجزای مختلف استفاده می شود که 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 دوپوسته توجه نمی‌شود و تنها نماهای تک پوسته مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرند. اجزای نمابه 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 مات نمای ساختمان (دیوارها، سقفها، دال‌ها، دیوارهای زیرزمین و درهای مات)	اجزای شفاف نمای ساختمان (پنجره‌ها، هواکش‌ها، درها، دیوار شیشه‌ای، شیشه و غیره)
جهت گیری ساختمان، شکل و فاصله از ساختمان‌های اطراف	جهت گیری اجزای نما و موانع خارجی
موقعیت ساختمان نسبت به ساختمان دیگر	ابعاد جزء شفاف
پوشش خاک و ماهیت زمین	ضریب انتقال حرارت شیشه
ضخامت، چگالی، گرمای ویژه و ضرایب هدایت مواد تخلخل و زبری سطح	ضرایب جذب نور و انعکاس سطوح ضریب انتقال شیشه برای نور مستقیم خورشید
ضریب انتقال و جذب صدا از سطح	ضریب انتقال شیشه برای صدا
عمق حفره بین لایه‌ها	نوع قاب مورد استفاده برای جزء شفاف
ضخامت و جذب صدا از مواد عایق مورد استفاده در داخل لایه	فاکتور تعمیر و نگهداری لعاب
نوع ارتباط بین لایه‌های مواد مختلف و تعداد آنها	خواص حرارتی فاصله‌انداز و حفره در سیستم شیشه

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

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 یرای ایجاد حفاظت ساختمان در مقابل محیط اطراف الزامی است. این نوع پوشش ساختمان به سادگی از دیوارهایی (می‌تواند از آجر، سنگ، بلوک‌های پیش ساخته باشد) با دهانه‌ای هماهنگ با سازه و سقف و تامين روزنه‌هایی برای نورگیری در

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.

و از غرب به خیابان فدائیان اسلام و از جنوب به خیابان دولت آباد، کوه بی بی شهربانو و کارخانه سیمان و از شرق به کوه های شرقی تهران و حد شرقی اراضی افسریه منتهی می شود.

تا سال ۱۴۰۰ جمعیت کلی منطقه پانزده دربرگیرنده بیست و یک محله ۶۵۹۴۶۸ نفر اعلام شده است. از این منطقه به عنوان پرجمعیت ترین منطقه تهران یاد می شود. همچنین ۲۰۹۱۴۱ خانوار در این منطقه زندگی می کنند. همچنین تراکم جمعیت منطقه ۱۵ نفر در هکتار می باشد.

شهرداری منطقه ۱۵ محدوده خدماتی خود را میان ۷ ناحیه تقسیم کرده است (شکل ۵) که محدوده ۶ 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 محال و اوضاع جمعیتی ساکنین و در راستای تشکیل انجمن های شورایی به ۲۰ محله تقسیم شده است (برگرفته از سایت شهرداری، ۱۴۰۰).

زمین ها، جهت گیری، نسبت طول به عرض، فراوانی قطعه ها و مساحت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

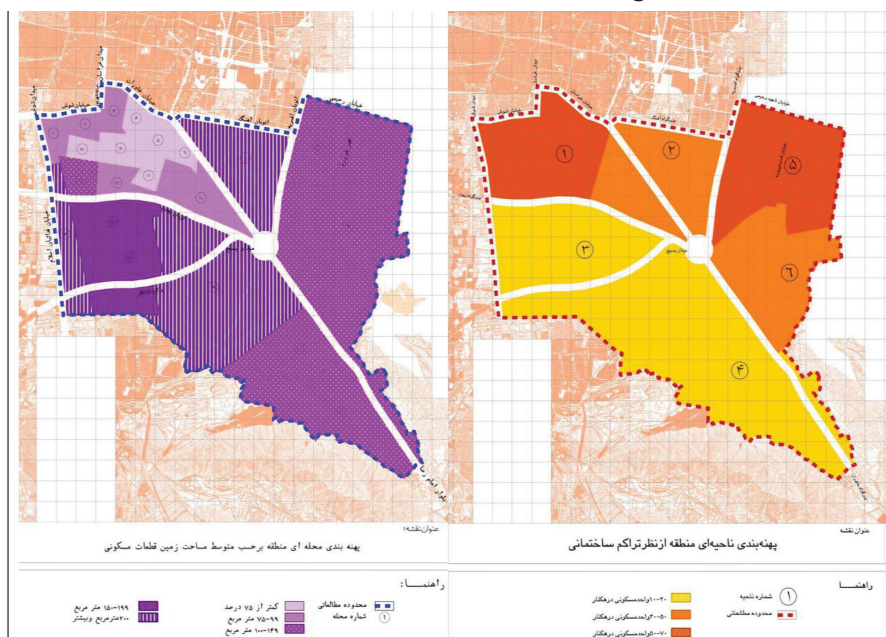
در مطالعاتی که تا کنون بر روی موضوع پژوهش حاضر انجام شده است، اغلب شکل ها به صورت فرضی و دور از واقعیت انتخاب شده اند. به منظور جلوگیری از این موضوع و جلب قابلیت استفاده از نتایج، یکی از بلوک های شهر تهران به عنوان محدوده مطالعه انتخاب گردیده است. در میان مناطق مختلف شهر تهران، منطقه ۱۵ به دلایل زیر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

- دارا بودن 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 محله های قدیمی این منطقه اعم از شوش - شبیر، مسگرآباد، مشیریه، بهشتیه خاوران یا قبرستان یهودی ها، کیانشهر، مسعودیه و خاور شهر بازمی گردد.

• منطقه ۱۵ از شمال به پادگان قصر فیروزه، ۴۵ متری آهنگ، خیابان خاوران و شوش شرقی

شکل ۵: ناحیه های منطقه ۱۵ www.tehran.ir



نتایج به دست 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.

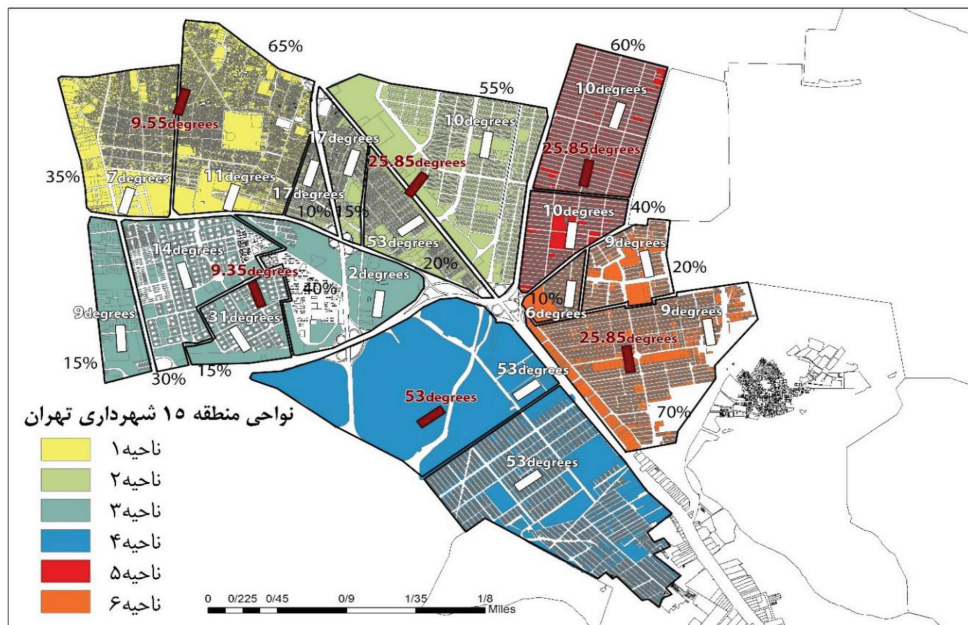
جدول ۳: میانگین قطعات در نواحی مختلف نگارندگان

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 جدول ۳ دیده می شود بیشترین فراوانی قطعات مربوط به نواحی ۵ و ۶ می باشد که عموماً مساحت آنها ۱۲۰ متر مربع می باشد. قطعات با این مترای دارای نمای ۶ متری هستند که جز نماهای بسیار متداول در این منطقه است و حجم زیادی

از طرح های این منطقه را شامل می شود. بزرگترین قطعات مربوط به ناحیه ۳ بوده و کشیدگی کمتری را نسبت به بقیه مناطق دارا می باشند. جهت گیری ها از جنوب شرقی تا جنوب غربی در نواحی مختلف متفاوت است.

شکل ۶: بررسی فایل GIS منطقه ۱۵



پلان های 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 می شوند. در این قطعه بندی ها

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 می گیرند. در تیپ ۲ عموماً تراس در سمت آشپزخانه قرار می گیرد.

جدول ۴: نماهای ۶ متری منطقه ۱۵

		<p>نمای ۶ متری (تیپ ۱)</p>
		<p>نمای ۶ متری (تیپ ۲)</p>
		<p>نمای ۶ متری (تیپ ۳)</p>

غیر شفاف آنها بسیار نزدیک به هم و با مصالح مشابه و متداول منطقه اجرا می شوند. درصد شیشه به دیوار بین ۴۰ تا ۵۰ درصد و مصالح به کار رفته در اغلب نماها سنگ و آجر می باشد.

نماهای در قطعات بزرگ تر عموماً دارای ابعاد ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ متری می باشند که طراحی آنها بر اساس پلان های مورد تایید کارفرما تهیه می شود ولیکن دارای نسبت سطوح نور گذر و

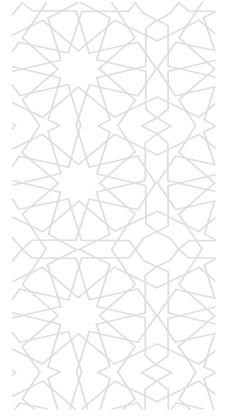
جدول ۵: سایر نماهای متداول منطقه ۱۵

		<p>نمای ۱۲ متری (تیپ ۱)</p>
		<p>نمای ۱۲ متری (تیپ ۲)</p>
		<p>نمای ۱۴ متری</p>
		<p>نمای ۱۸ متری</p>

نتیجه گیری

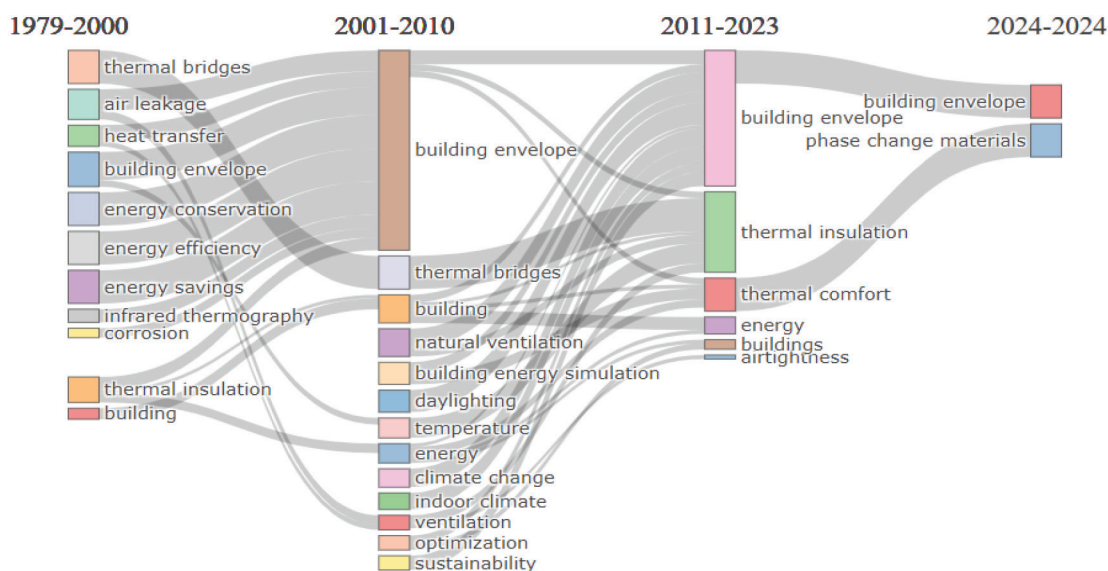
رسیدن به اهداف پایداری با تأمین آسایش حرارتی و استفاده از راه‌حل‌های مقرون به صرفه، یک چالش پیچیده است که نیازمند بهینه‌سازی طراحی ساختمان با چندین تابع هدف و متغیر طراحی می‌باشد.

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

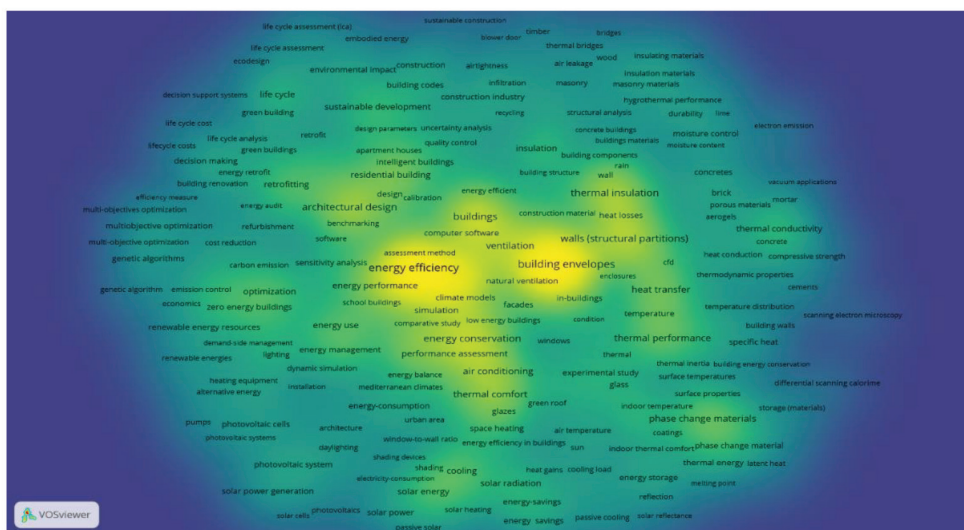
حرارتی ساختمان مورد توجه قرار گرفت (شکل ۷). همانگونه که مشاهده می شود از سال ۲۰۱۰ میلادی به صورت جدی تر این موضوع مورد بررسی قرار گرفت و در سال های اخیر با تأکید بر مصالح ادامه دارد.



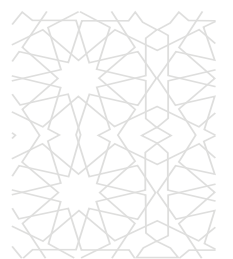
شکل ۷: فراوانی کلید واژه های بررسی شده در ارتباط با رفتار حرارتی پوسته ساختمان بر اساس سال به کمک اسکوپوس

همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می شود، موضوعات مورد مطالعه در ارتباط با پوسته ساختمان، بیشتر پیرامون مصرف انرژی، عایق حرارتی، طراحی ساختمان، انرژی خورشیدی و ساختمان های مسکونی انجام

شده و همانگونه که در تصویر مشاهده می شود، جنس جداره ها و نوع شیشه کمتر از بقیه موارد مورد بررسی قرار گرفته اند و پیشنهاد می شود و برای مطالعات آینده این موضوعات بررسی شوند.

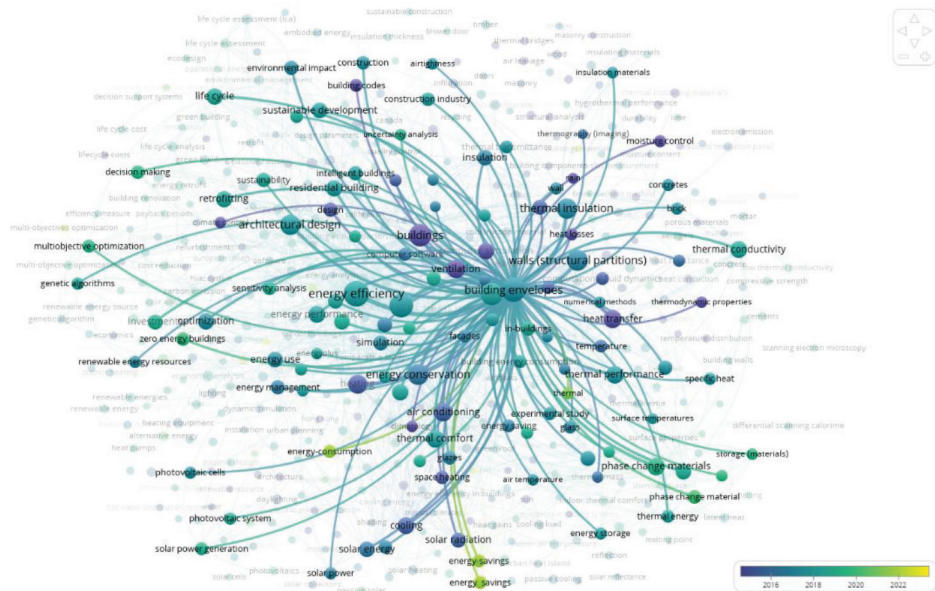


شکل ۸: فراوانی موضوعات بررسی شده در ارتباط با رفتار حرارتی پوسته ساختمان



موضوعات مربوط به مصرف انرژی در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند و نشان دهنده جدید بودن موضوع می‌باشد.

شکل ۹ موضوعات بررسی شده در ارتباط با پوسته ساختمان در سال‌های مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود



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

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.

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 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 ۶، ۱۲، ۱۴ و ۱۸ متری تقسیم‌بندی شده‌اند. بیشترین فراوانی نماها در نواحی ۵ و ۶ وجود دارد که معمولاً دارای

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.

- 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](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.egy.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:[10.1016/j.enbuild.2017.09.095](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.095).
- 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](https://doi.org/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](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*

- 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., Alrifayy, 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., & Mwashia, 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.ijbsbe.2014.03.002.
- Iwaro, J., Mwashia, 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](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>.
- Pè 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](https://doi.org/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., & Haghghat, 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](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.016).
- Monsen, W. A., Klein, S. A., & Beckman, W. A. (1981) Prediction of direct gain solar heating system performance. *Solar Energy*, 27(2), 143–147. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90036-0](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, 130930. doi:[10.1016/j.jclepro.2022.130930](https://doi.org/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