مجلهٔ منظر، ۱۴(۵۹)، ۳۰-۳۹ / تابستان ۱۴۰۱
DOI: 10.22034/MANZAR.2021.312873.2163

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Prioritization of Façade Retrofit Measures to Achieve Energy Efficiency in Existing Office Buildings in Tehran
در همین شمارهٔ مجله به چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

اولویت راهکارهای بهسازی نما به منظور بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های اداری موجود شهر تهران*

سعاد صریحی
پژوهشگر دکتری گروه معماری، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

محسن فیضی**
استاد گروه معماری، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

فاطمه مهدیزاده سراج
استاد گروه معماری، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷ تاریخ قرارگیری روی سایت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱

چکیده| در شهر تهران، ساختمان‌های نوساز تنها بخش کوچکی از کل ساختمان‌های شهر را شکل می‌دهند و پرداختن به ساختمان‌های موجود که سهم بیشتری از انرژی را به مصرف می‌رسانند اهمیت ویژه‌ای دارد. نمای ساختمان به‌عنوان عضوی که بیشترین تبادل انرژی را میان فضای درون و بیرون انجام می‌دهد سهم بسزایی در کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های موجود دارد. لذا استفاده از راهکارهای بهسازی نما می‌تواند به شکل مؤثری به کاهش مصرف انرژی لازم برای سرمایش و گرمایش در ساختمان‌های موجود بیانجامد. پژوهش حاضر می‌کوشد تا با بررسی میزان کاهش مصرف انرژی از طریق بهسازی نما، به تأثیر و اولویت‌های پارامترهای عایق حرارتی، نوع پنجره و سایه‌بان جهت بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های اداری موجود با جهت‌گیری جنوبی در شهر تهران پی ببرد. به عبارت دیگر پرسش از میزان تأثیر پارامترهای بهسازی است. این پژوهش بر این فرض استوار است که استفاده از سایه‌بان نسبت به سایر پارامترها تأثیر بیشتری در کاهش مصرف انرژی در جنوب دارد. با توجه به اینکه رویکرد روش‌شناختی پژوهش حاضر کمّی است، از راهبرد شبیه‌سازی و مدلسازی پارامتریک با استفاده از نرم‌افزار راینو و استفاده از افزونهٔ گرسهاپر با تکیه بر موتورهای شبیه‌سازی انرژی‌پلاس و اوپن استودیو و افزونه‌های هانی بی و لیدی‌باگ استفاده شده است. همچنین از روش بررسی مقایسه‌ای برای مقایسهٔ مصرف انرژی ساختمان پس از بهسازی نما با حالتی پایه از ساختمان‌های اداری استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند با انتخاب صحیح پارامترهای بهسازی، می‌توان مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری ناکارآمد را به کمتر از نصف وضعیت فعلی رساند. همچنین در نماهایی با ضریب تبادل حرارتی بالا، اولویت پارامترها برای کاهش مصرف انرژی کل به ترتیب با نصب سایه‌بان با عمق مناسب، افزودن عایق حرارتی و تعویض پنجره است. درمقابل در نماهایی با ضریب تبادل حرارتی کمتر، استفاده از پنجرهٔ مناسب پس از سایه‌بان در اولویت قرار دارد.

واژگان کلیدی| *بهسازی نما، کاهش مصرف انرژی، مدلسازی پارامتریک، سرمایش، گرمایش.*

مقدمه| با توجه به فراگیر شدن مشکلات زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر، ضرورت پرداختن به مباحث مرتبط با انرژی اهمیت بسیاری یافته است. در دهه‌های اخیر صرفه‌جویی در مصرف انرژی بیشتر متوجه ساخت و طراحی ساختمان‌هایی با حداقل مصرف انرژی بوده است. این در حالی است که ساختمان‌های نوساز تنها بخش کوچکی از کل ساختمان‌های موجود را تشکیل داده‌اند و رشد ساختمان‌های نوساز نسبت به ساختمان‌های موجود هر ساله ۱ تا ۱۰ درصد است (Capeluto & Ochoa, 2014, 375). در این راستا، ساختمان‌های

** نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۲۱۲۳۱۱۴۸، mfaizi@iust.ac.ir

موجـود بـه دلیـل ناکارآمدی طراحی و سـاخت و مشـکلات متعدد پوسـتهٔ سـاختمانی مرتبط با نمـا، جداره‌ها و بازشـوها، بزرگ‌ترین مصرف‌کننـدهٔ انـرژی در مقایسـه بـا سـایر بخش‌هـا در حـوزهٔ سـاختمان هسـتند (وزارت نیـرو، ۱۳۹۲، ۶۳).

پوسـتهٔ سـاختمان مهمتریـن بخـش سـاختمان‌های موجـود در رابطـه بـا اتـلاف انـرژی اسـت و نمـای سـاختمان به‌عنـوان بخش گسـترده‌ای از پوسـته سـاختمانی امـکان تبـادل حرارتـی زیـادی بـا محیـط اطـراف را فراهـم مـی‌آورد. نمـای سـاختمان می‌توانـد ۲۰ تـا ۳۰ درصـد تبـادلات حرارتـی را بـه خـود اختصـاص دهـد، کـه ایـن میـزان در سـاختمان‌های قدیمی‌تـر نیـز بـه تناسـب بالاتـر اسـت (Dall'O', Galante & Pasetti, 2012,12). در ایـران حـدود ۷۰ درصـد از مصـرف انـرژی مرتبـط بـا بخـش سـاختمان در سـاختمان‌های عمومـی و دولتـی بـه مصرف می‌رسـد (مولایی، پیله‌چی‌هـا و شـادانفر، ۱۳۹۸، ۱۱۸) و ایـن سـاختمان‌ها معمـولاً بـار بالایـی از افزایـش حـرارت داخلـی به دلیـل تـردد و تجهیزات الکترونیکـی دارنـد (شمشـیری، دوازده‌امامـی و عطایـی، ۱۳۹۶، ۱۲۸). ایـن یافته‌هـا ضـرورت بررسـی امـکان بهسـازی نمـا در سـاختمان‌های اداری را به‌خوبـی روشـن می‌سـازند. در این راسـتا بهسـازی نمـای سـاختمان‌های اداری موجـود نه‌تنهـا بـه کاهـش قابـل توجـه انـرژی لازم بـرای سـرمایش و گرمایـش می‌انجامـد، بلکـه بـه ذخیـرهٔ سـرمایهٔ اقتصـادی نیـز کمـک شـایانی می‌کنـد. همچنیـن بهسـازی نمـا می‌توانـد عمـر مفیـد سـاختمان را تا ۷۰ سـال افزایـش دهـد و مصـرف انـرژی را از ۵ درصد تا بیـش از ۷۰ درصـد بهبـود بخشـد(Aste & Del Pero, 2013, 422) و همگام با سـایر ضوابـط، دسـتیابی بـه بهره‌وری انـرژی را در مقیاس شـهری هموارتـر کنـد (Stevanovic, 2013, 180).

بیان مسئله

نمـای سـاختمان‌های موجـود در تهـران اغلـب بـدون توجـه بـه تمهیـدات کاهـش مصرف سـاخته شـده‌اند و مسـئلهٔ بهسـازی نما در ضوابـط شـهری بیشـتر از لحاظ بصـری مورد توجه قـرار گرفته اسـت. وجـود اجـزای ناکارآمـد در دیـوارهٔ نمـا و سـطوح بازشـو، مشـکلات مربـوط بـه ضریـب تبـادل حرارتی زیـاد بدنهٔ نمـا، عدم وجـود عایق‌هـای حرارتی، سـطوح شیشـه‌ای تک‌جداره، مشـکلات هوابنـدی، سـایه‌بان‌های ناکارآمـد و مصالـح فرسـوده می‌تواننـد منجـر بـه مصرف بیـش از اندازهٔ انرژی در سـاختمان شـوند. با این وجـود بـا بهبـود اجزای نمـا به ویـژه در جهت نورگیر سـاختمان و اسـتفاده از روش‌هـای فعـال و غیرفعـال کاهـش مصـرف انرژی در سـاختمان، می‌تـوان بهـره‌وری انـرژی در سـاختمان‌های موجـود را بهبـود بخشـید. اقدامـات متعـددی بـرای بهسـازی نمـا در ایـن زمینـه وجـود دارند کـه هرکدام رفتـار و تأثیر متفاوتـی در کاهش مصـرف انـرژی از خـود نشـان می‌دهنـد. بعضـی از ایـن اقدامـات در کاهـش مصـرف انـرژی لازم بـرای سـرمایش عملکـرد بهتـری دارنـد، درحالیکـه بعضی دیگـر در کاهش مصرف انـرژی لازم برای گرمایـش مؤثـر هسـتند. لذا بررسـی میـزان کاهش مصـرف انرژی بـا اسـتفاده از پارامترهـای مؤثـر بهسـازی نمـا در اقلیـم تهران که هـم بـه سـرمایش و هـم گرمایـش در طـول سـال نیازمنـد اسـت و یافتـن ترتیـب اولویـت به‌کارگیـری ایـن پارامترهـا بـه منظـور کاهـش حداکثـری مصرف انـرژی لازم برای سـرمایش و گرمایش، مسـئلهٔ اصلـی ایـن پژوهـش را شـکل می‌دهد.

هدف و پرسش پژوهش

بـا توجـه بـه هدف ایـن پژوهش که بررسـی میـزان کاهش مصرف انـرژی در سـاختمان از طریـق بهسـازی نمـا و تعییـن اولویت‌های اسـتفاده از پارامترهـای بهسـازی نمـا در سـاختمان هـای اداری موجـود اسـت، سـؤالات زیـر مطرح می‌شـوند:

- متوسـط مصـرف انـرژی در سـاختمان‌های اداری موجـود در تهـران از طریـق بهسـازی نما تا چه میـزان می‌توانـد کاهش یابد؟
- کدامیـک از پارامترهـای بهسـازی نما که شـامل عایـق حرارتی، نـوع پنجـره و سـایه‌بان می‌شـوند اولویـت بیشـتری در کاهـش مصـرف انـرژی لازم بـرای سـرمایش و گرمایـش و کاهـش مصرف انـرژی کل در سـاختمان دارنـد؟

فرضیهٔ پژوهش

فـرض ایـن پژوهـش بـر ایـن اسـت کـه در سـاختمان‌های اداری موجـود در اقلیـم تهـران که هم به سـرمایش در تابسـتان و هم به گرمایـش در زمسـتان نیازمنـد هسـتند، ایجـاد تعادل میـان میان نیـاز بـه سـرمایش و گرمایـش از طریـق افـزودن سـایه‌بان با عمق مناسـب تحقـق می‌یابـد و ایـن اقدام نسـبت بـه سـایر پارامترهای بهسـازی اولویـت دارد. دیگـر پارامترهـای بهسـازی کـه شـامل افـزودن عایـق حرارتی و تعویـض پنجره می‌شـوند در اولویت های بعـدی قـرار می‌گیرند.

پیشینهٔ تحقیق

بـه طـور کلـی اقدامـات بهسـازی نمـا بـه منظـور کاهـش مصرف انـرژی در سـاختمان شـامل مداخـلات جزیـی تـا کلـی در نمـا می‌شـوند. در مطالعـات پیشـین، ایـن اقدامـات بـه شـیوه‌های گوناگونـی دسـته‌بندی شـده‌اند کـه در همـهٔ آن‌هـا بـه بهبـود عناصـر نمـا، تخریـب نمـای موجـود و جایگزینـی آن بـا نمایـی جدیـد و در نهایـت افـزودن یک پوسـتهٔ جدیـد بر روی نما اشـاره شـده اسـت(Rey, 2004, 367; Rysanek & Choudhary, 2013, 325; Sarihi, Mehdizadeh Saradj & Faizi, 2021, 64; Sarihi & Derakhshan, 2018, 8). اقدامـات مربوط به بهبود عناصر نما با توجه به هزینه و زمان کمتر برای بهسـازی به شـکل گسـترده‌تری مـورد مطالعـه قـرار گرفته‌انـد. از جملـهٔ ایـن اقدامـات می‌تـوان به افزودن عایق حرارتی به نما (Alonso, Oteiza, García-Navarro &

(Martín-Consuegra, 2016, 252; Aste & Del Pero, 2013, 409)، تعویض بازشوها با پنجره‌های چندجداره (Carlos & Corvacho, 2010, 568; Radwan, Hanafy, Elhelw, & El-Sayed, 2016, 3065)، بهبود هوابندی پوستهٔ ساختمان (Wang, Ding, Geng & Zhu, 2014, 235)، افزودن یا کاستن سایه‌بان (Aste & Del Pero, 2013, 409; Wang et al., 2014, 236)، تغییر ابعاد بازشو (Harkouss, Fardoun, & Biwole, 2018, 592; Zhou, Zhang, Wang, Zuo, He & Rameezdeen, 2016, 3606) و افزودن پوشش‌های رنگی و کم گسیل بر جدارهٔ نما (Alonso et al., 2017,470) اشاره کرد. در جدول ۱، اقدامات بهسازی نما و نتایج حاصل از ترکیب آن‌ها به منظور کاهش مصرف انرژی در اقلیم گرم و سرد در به تفصیل ارائه شده‌اند. در مطالعات انرژی در ایران نمونه‌های محدودی به بررسی ویژگی‌های پوستهٔ خارجی نما و میزان مصرف انرژی پرداخته‌اند که از این میان می‌توان به مطالعهٔ مصالح پوستهٔ خارجی (شفیعی دستجردی، صادقی و رفیعی، ۱۳۹۹، ۹۵)، استفاده از نمای زیستی (حقیر، تشکری، رضازاده و احمدی، ۱۳۹۹، ۳۳) و بهره‌گیری از تناسبات بازشوی مناسب (مولایی و همکاران، ۱۳۹۸، ۱۱۸) جهت بهره‌وری انرژی اشاره کرد. در این مطالعات میزان تأثیر پارامترهای بهسازی در کاهش مصرف انرژی نهایی به طور مجزا دیده نشده است. در سایر مطالعات نیز که به ترکیبی از پارامترهای بهسازی پرداخته‌اند، رویکردی

جدول ۱. اقدامات بهسازی نما و میزان کاهش مصرف انرژی درساختمان از طریق ترکیب پارامترهای بهسازی در اقلیم سرد و گرم. مأخذ: نگارندگان.

	مصرف انرژی		اقدامات بهسازی	پارامترهای بهسازی نما			منبع	
	میزان بهبود مصرف انرژی	بهبود سیستم‌ها		سایبان	پنجره	عایق حرارتی		
اقلیم سرد	کاهش مصرف انرژی به میزان ۵۷ درصد (۴۷ درصد گرمایش، ۳۶ درصد سرمایش و ۴۳ درصد روشنایی)	بهبود تهویهٔ مطبوع و نورپردازی	افزایش سطح بازشوی نمای جنوبی به ۴۰ درصد، جایگزینی بازشو با پنجرهٔ دوجداره، عایق حرارتی پلی‌استایرن منبسط شده	-	●	●	تیانجین، چین	
	کاهش ۱۵/۴ درصد مصرف انرژی با استفاده از عایق حرارتی خارجی	بهبود تهویهٔ مطبوع	استفاده از عایق حرارتی پلی استایرن منبسط شده	-	-	●	(Alonso et al., 2016) مادرید، اسپانیا	
	کاهش ۵۲ درصد مصرف انرژی گرمایشی	-	جایگزینی با پنجرهٔ دو جداره و جایگزینی در بالکن، عایق حرارتی پلی‌استایرن منبسط شدهٔ داخلی	-	●	●	Carlos & Corvacho,) (2010 کوویلا، پرتغال	
	کاهش ۶۵/۲۹ درصد تا ۷۱/۲۰ درصد کل مصرف انرژی	بهبود تهویهٔ مطبوع و نورپردازی	کاهش سطح بازشو به ۵۰ درصد، استفاده از پنجرهٔ دو جداره، سایه‌بان‌های متحرک خارجی، عایق حرارتی، بهبود هوابندی	●	●	●	(Wang et al., 2014) تیانجین، چین	
اقلیم گرم	کاهش ۱۵ درصد کل مصرف انرژی (۳۲ درصد کاهش مصرف مربوط به بهبود سیستم گرمایشی و تعویض پنجره‌ها)	بهبود تهویهٔ مطبوع	جایگزینی بازشو با پنجرهٔ دوجداره، عایق حرارتی بسیار نازک	-	●	●	Semprini et al.,) (2016 بولونیا، ایتالیا	
	کاهش ۷۲ درصد کل مصرف انرژی (با استفاده از پنجرهٔ دو جداره) و ۷۷ درصد (با استفاده از پنجرهٔ سه جداره)	بهبود تهویهٔ مطبوع	جایگزینی پنجره‌ها، افزودن سایه‌بان داخلی، عایق حرارتی در نما و سقف، بهبود هوابندی	●	●	●	Tovarović Ivano-) vić-Šekularac, & (Šekularac, 2017 بلگراد، صربستان	
	کاهش مصرف سرمایش از ۰/۴۹ درصد تا ۱۶/۴۷ درصد (۰/۴۹ درصد تا ۰/۸۳ درصد با عایق حرارتی، ۴/۳۵ درصد تا ۱۰/۶۱ درصد با سایه‌بان)	-	جایگزینی پنجرها، بهبود سایه‌بان، استفاده از عایق حرارتی ۴ و ۱۰ سانتی‌متری، بهبود هوابندی	●	●	●	Song, Ye, Li, Wang,) (& Ma, 2017 گوانگژو، چین	
	کاهش ۴۱/۲۲ درصد کل مصرف انرژی (۲ درصد با عایق حرارتی، ۶/۳ درصد با جایگزینی پنجره‌ها، ۱۱-۴/۳ درصد با تغییر سطح بازشو)	بهبود تهویهٔ مطبوع و نورپردازی	کاهش سطح بازشو در جبههٔ شرقی و غربی، جایگزینی پنجره، افزودن عایق حرارتی پشم شیشه	-	●	●	اسکندریه، مصر	

برای تعیین اولویت‌های استفاده از این پارامترها در اقلیم‌هایی که به سرمایش و گرمایش نیازمند هستند اتخاذ نشده است. اما این پژوهش رویکردی متفاوت دارد و با استفاده از راهبرد شبیه‌سازی و روش بررسی مقایسه‌ای به بررسی این موضوعات خواهد پرداخت.

مبانی نظری

مفهوم بهسازی نما تعمیرات جزئی عناصر نما تا بهسازی سراسری نما را شامل می‌شود و می‌تواند جنبه‌های انرژی، تکنولوژی، عملکرد و زیبایی‌شناسی را در برگیرد (Wilkinson, 2012, 399). اما بهسازی نما در حوزهٔ انرژی به انجام مداخلاتی از طریق پارامترهای بهسازی نما اطلاق می‌شود که هدف آن کاهش مصرف انرژی در ساختمان و هزینه‌های مربوط به آن است (Asadi, da Silva, Antunes & Dias, 2012, 371). پارامترهای بهسازی در یک دسته‌بندی گسترده در تصویر ۱ نشان داده شده‌اند که اغلب به اقدامات تعدیلی و جایگزینی عناصر نما می‌پردازند. در این میان استفاده از عایق حرارتی، پنجره‌های چند جداره و سایه‌بان با توجه به بستر اقلیمی و الزامات اجرایی و اقتصادی می‌توانند به بهبود عملکرد حرارتی بهتر منجر شوند (Sarihi et al., 2021). جهت بررسی کارایی اقدامات بهسازی لازم است پارامترهای بهسازی بر روی یک مدل شبیه‌سازی شوند تا میزان مصرف انرژی در این مدل محاسبه و مقایسه شود (International Energy Agency (IEA), 2013, 21; Luddeni, Krarti, Pernigotto & Gasparella, 2018, 297). لذا از یک مدل پایه که معرف ساختمان‌های اداری شهر تهران است استفاده می‌شود و تأثیر هر پارامتر بر مدل پایه ارزیابی می‌شود.

روش پژوهش

جهت بررسی امکان کاهش مصرف انرژی از طریق بهسازی نما، در گام اول یک اتاق به‌عنوان نمونه‌ای از فضای اداری در چهار حالت نمای F ۱، F ۲، F ۳ و F ۴ مدلسازی شد. این مدل پایه در شهر تهران قرار گرفته است و هیچ‌گونه سایه‌اندازی از محیط اطراف خود ندارد. در گام دوم حالت‌های متفاوتی از عایق حرارتی (A)، نوع پنجره (B) و سایه‌بان(C) به‌عنوان پارامترهای بهسازی نما به مدل پایه افزوده شدند. در گام سوم میزان مصرف انرژی در حالت پایه و حالت‌های بهسازی شده با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی محاسبه شدند. این شبیه‌سازی با استفاده از موتور انرژی‌پلاس (نسخهٔ ۹/۳) و اوپن‌استودیو (نسخهٔ ۳/۲/۰) انجام شده‌است و مبنای مقایسه میزان مصرف سالانهٔ انرژی سرمایشی و گرمایشی و روشنایی در ساختمان است. به منظور بررسی کلیهٔ حالت‌های بهسازی، از الگوریتم‌های مولد با استفاده از افزونهٔ گرسهاپر در نرم‌افزار راینو استفاده شده است تا با تغییر هر کدام پارامترهای بهسازی در یک محیط پارامتریک، تغییرات در مدل نهایی اعمال شود. همچنین، داده‌های مربوط به مصرف انرژی با

تصویر ۱. اقدامات بهسازی نما جهت کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های موجود. مأخذ: Sarihi et al., 2021

استفاده از افزونه‌های رابط هانی‌بی[1] و لیدی‌باگ[2] به موتورهای محاسبهٔ مصرف انرژی متصل شدند. در گام نهایی با مقایسهٔ میزان کاهش مصرف با مدل پایه، پارامترهای بهسازی نما از منظر کاهش مصرف انرژی اولویت‌بندی شدند. از آنجایی‌که این پژوهش بر روند بهسازی و اولویت‌بندی پارامترهای بهسازی تأکید دارد، چارچوب این مطالعه می‌تواند برای سایر کاربری‌ها و جهت‌گیری‌ها در اقلیم متفاوت مورد استفاده قرار گیرد.

مدل پایه

ابعاد مدل پایه در این پژوهش با توجه به مدل مرجع رینهارت تعیین شده‌اند که به طول ۶ متر و عرض ۴ متر و ارتفاع ۳ متر، با نسبت سطح بازشو ۳۰ درصد هستند و بدون سایه‌بان در ارتفاع ۱۵ متری از سطح زمین قرار گرفته است(Reinhart, Jakubiec & Ibarra, 2013). ابعاد بازشو در این مدل ۴/ ۲ در ۵/ ۱ متر و با فاصلهٔ ۱ متر از سطح کف قرار گرفته است[3]. از چهار گونه نمای رایج در ایران به‌عنوان مدل‌های پایه پژوهش استفاده شده است (نشریهٔ ۵۵، مشخصات فنی عمومی‌کارهای ساختمانی، ۱۳۹۵). این چهار گونه که با عنوان F۱، F۲، F ۳ و F ۴ معرفی شده‌اند به ترتیب از نمای آجر فشاری، بلوک سفالی، بلوک سیمانی لیکا و بلوک بتنی اتوکلاو تشکیل شده‌اند (Rosti, Omidvar, & Monghasemi, 2020). ترکیب‌بندی لایه‌های نما به تفصیل در جدول ۲ شرح داده شده‌است.

در این مدل، پکیج هواساز (با دمای ثابت و حجم متغیر) با مصرف گاز طبیعی برای گرمایش و سیستم کولر آبی با مصرف انرژی الکتریکی برای سرمایش در نظر گرفته شده‌اند (مولایی و همکاران، ۱۳۹۸). میانگین ضریب عملکرد سالانهٔ سیستم سرمایشی ۰۲/ ۳ و سیستم گرمایشی ۸/ ۰ است و سیستم تهویه به صورت ترکیبی (استفاده از سیستم تهویه در مواقعی که امکان تأمین شرایط آسایش فراهم نباشد) درنظر گرفته شده است. با استفاده از فایل آب و هوایی تهران ویژگی‌های اقلیمی به مدل پایه افزوده شده و محاسبات مصرف انرژی در بازهٔ زمانی یکساله انجام شده‌اند. این مدل به شکل یک اتاق با کاربری اداری با درصد اشغال ۵/ ۰ نفر در مترمربع و بار تجهیزاتی ۸۸ /۶ W/m² و بار روشنایی ۱/ ۱۰ W/m² درنظر گرفته شده است و آستانهٔ سرمایش ۲۶ درجه و آستانهٔ گرمایش ۲۰ درجه سانتی‌گراد (شفیعی دستجردی و همکاران،۱۳۹۹ ، ۱۰۰) و آستانهٔ روشنایی ۳۰۰ lx در زمان استفاده (۸ صبح تا ۶ بعدازظهر) تعیین شده است.

پارامترهای بهسازی

در این پژوهش تأثیر ترکیبی سه پارامتر عایق حرارتی (A)، نوع پنجره (B) و سایه‌بان (C) بر کاهش مصرفی انرژی لازم برای سرمایش و گرمایش و روشنایی و کل انرژی مصرفی بررسی می‌شوند. برای هرکدام از این پارامترها چندین گام طبق جدول ۳ تعریف شده است. سپس اطلاعات مربوط به پارامترها و گام‌های متعدد آن‌ها به صورت پارامتریک مدلسازی شده و به مدل پایه افزوده شده‌اند. دسته‌بندی این گام‌ها با توجه به اقلام قابل دسترس و مقرون به صرفه‌تر در بازارهای ایران است و با توجه به محدودیت‌های پیش‌آمدگی در ساختمان‌های موجود، نحوهٔ قرارگیری سایه‌بان در این مدل به شکل افقی و با فاصلهٔ عمودی ۳۰ سانتی‌متری از یکدیگر است (تصویر ۲).

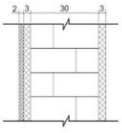
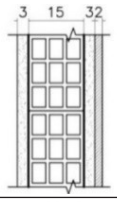
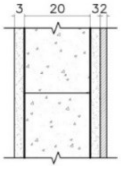
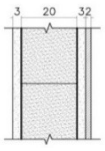
بحث

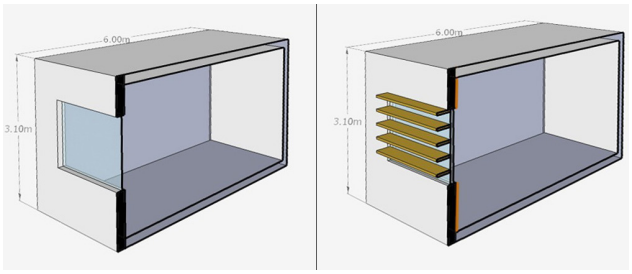
طبق نتایج، مداخلات بهسازی نما در این پژوهش به طور قطع در کاهش مصرف انرژی سرمایشی تأثیر مثبتی دارند، اما ممکن است باعث افزایش انرژی لازم برای گرمایش و روشنایی شوند که به دلیل افزودن عمق سایه‌بان است. با این وجود، ترکیب هر سه پارامتر عایق حرارتی، پنجره و سایه‌بان می‌تواند تأثیرات منفی در سرمایش و روشنایی را خنثی کند و باعث کاهش کل انرژی مصرفی شود. دامنهٔ کاهش کل انرژی مصرفی در ساختمان‌های اداری بین ۵ درصد تا ۵۴ درصد متغیر است که نزدیک به نتایج مطالعات مشابه است (Sarihi et al., 2021, 64). بهترین نتایج زمانی که از سایه‌بان C ۲ استفاده شود به دست می‌آیند که باعث کاهش ۳۵ درصدی تا ۵۵ درصدی مصرف کل می‌شوند. این موضوع لزوم بهره‌گیری از سایه‌بان با عمق مناسب را برای دستیابی به بهترین نتایج در سوی جنوب تأیید می‌کند که هم‌راستا با سایر مطالعات در این حوزه است (Capeluto & Ochoa, 2014, 382). در این مطالعه نمای F ۱ نسبت به تغییرات بهسازی حساس‌تر است و متوسط کاهش مصرف در نمای F ۱ نسبت به نمای F ۴ بیشتر است. به عبارتی دیگر اثر بهسازی بر نماهایی با ضریب تبادل حرارتی بیشتر است و سرمایه‌گذاری برای بهسازی آن‌ها اولویت دارد. به طور متوسط مصرف کل انرژی در ساختمان‌هایی با نمای F ۱ حدود ۳۵ درصد و در نمای F ۴ تا ۲۲ درصد کاهش پیدا می‌کند. هرچند با انتخاب گام‌های صحیح‌تر میزان مصرف کل می‌تواند تا حداکثر ۵۴ درصد در نمای F ۱ و تا ۴۶ درصد در نمای F ۴ کاهش یابد. در مقابل، هنگامی که اقدامات نامناسبی در بهسازی نما اتخاذ شوند، میزان کاهش مصرف انرژی تنها ۵ درصد تا ۷ درصد است.

• تأثیر پارامترهای بهسازی بر کاهش انرژی لازم برای سرمایش

در بررسی کاهش مصرف انرژی لازم برای سرمایش، پارامتر C زمانی‌که عمق سایه‌بان از ۰ به ۲۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد،

جدول ۲. لایه‌بندی نماهای موجود در مدل پایه. مأخذ: نگارندگان.

شماره	نمای پایه	تصویر مصالح	نمایش لایه‌ها	مصالح تشکیل‌دهنده	ضخامت (cm)	ضریب تبادل حرارتی ($W/m^2.K$)
F1	آجر فشاری			پلاستر گچ (۳cm) آجر فشاری (۲۲cm) ملات ماسه و سیمان (۳cm) نمای سنگ یا آجر (۲cm)	۳۰	۲/۳
F2	بلوک سفالی			پلاستر گچ (۳cm) بلوک سفالی (۱۵cm) ملات ماسه و سیمان (۳cm) نمای سنگ یا آجر (۲cm)	۲۳	۱/۳
F3	بلوک سیمانی لیکا			پلاستر گچ (۳cm) بلوک لیکا (۲۰cm) ملات ماسه و سیمان (۳cm) نمای سنگ یا آجر (۲cm)	۲۸	۱/۱۴
F4	بلوک بتن اتوکلاو			پلاستر گچ (۳cm) بلوک اتوکلاو (۲۰cm) ملات ماسه و سیمان (۳cm) نمای سنگ یا آجر (۲cm)	۲۸	۰/۷۱
سایر مشخصات			پنجره تک‌جداره با جام ۴ میلی‌متر و قاب آلومینیم بدون شکست حرارتی، ضریب هدایت حرارتی : $W/m^2.K$ ۵/۸ نسبت بازشو به کل نما: ۳۰ درصد SHGC: ۰/۷۵ - VT: ۰/۸ -			



تصویر ۲. بهسازی نما با پارامترهای عایق حرارتی، راست: پنجره و سایه‌بان، چپ: مدل پایه. مأخذ: نگارندگان.

بیشترین تأثیرگذاری را دارد. در این حالت متوسط کاهش مصرف انرژی سرمایشی از ۲۰ درصد به ۴۶ درصد می‌رسد که کمی بیشتر از متوسط کاهش مصرف با استفاده از ترکیب کلیهٔ پارامترهاست که به میزان ۴۲ درصد بوده است (خط‌چین سبز رنگ نمودار در تصویر ۳). این موضوع کارایی سایه‌بان با عمق ۲۰ سانتی‌متر و بیشتر را در کاهش مصرف سرمایش تأیید می‌کند. اما افزایش عمق سایه‌بان در گام‌های بعد به مراتب تأثیر محدودتری دارد. طبیعتاً با استفاده از سایه‌بان C ۴ با عمق ۶۰ سانتی‌متر می‌توان به نتایج بهتری برای کاهش مصرف انرژی لازم برای سرمایش دست یافت، اما نتایج نشان می‌دهند که سایه‌بان با عمق بیش از ۲۰ سانتی‌متر به دلیل تأثیر معکوس آن بر کاهش انرژی کل مناسب نیست و این تأثیر معکوس حتی با افزودن عایق حرارتی بسیار ضخیم و استفاده از پنجره‌های سه لایه نیز جبران‌پذیر نیست. کاهش مصرف انرژی لازم برای سرمایش با استفاده از پارامتر A تنها با افزایش ضخامت عایق حرارتی از ۱ به ۳ سانتی‌متر قابل توجه است که متوسط کاهش مصرف را از ۴۰ درصد به ۴۶ درصد تغییر می‌دهد. اما استفاده از عایق ضخیم‌تر تغییری در کاهش مصرف ایجاد نمی‌کند، زیرا برای افزایش ضخامت عایق حرارتی آستانه‌ای وجود دارد که عبور از آن منجر به کاهش

جدول ۳. پارامترهای بهسازی نما در گام‌های گسسته. مأخذ: نگارندگان.

پارامتر	متغیر بهسازی	نوع	ضخامت (m)	(U–value (W/m².K	ID
A	عایق حرارتی	پلی‌استایرن منبسط شده (EPS) چگالی ۴۰ Kg.m³	۰/۰۱	۳/۹	A1
			۰/۰۳	۱/۳	A2
			۰/۰۵	۰/۷۸	A3
			۰/۰۷۵	۰/۵۲	A4
			۰/۱	۰/۳۹	A5
B	پنجره	پنجرهٔ دوجداره بدون گاز ۴-۱۲-۴ میلی‌متر	۰/۲۰	۳/۲	B1
		پنجرهٔ دوجدارهٔ گاز آرگون ۴-۱۲-۴ میلی‌متر	۰/۲۰	۲/۲	B2
		پنجرهٔ سه جدارهٔ بدون گاز ۴-۱۲-۴-۱۲-۴ میلی‌متر	۰/۳۶	۱/۱	B3
		پنجرهٔ سه جدارهٔ گاز آرگون ۴-۱۲-۴-۱۲-۴ میلی‌متر	۰/۳۶	۰/۹	B4
C	سایه‌بان	سایه‌بان ثابت افقی از جنس چوب حرارت‌دیدهٔ نصب‌شده در فواصل عمودی ۳۰ سانتی‌متر از یکدیگر	۰	–	C1
			۰/۲		C2
			۰/۴		C3
			۰/۶		C4

بیشتری در مصرف انرژی نمی‌شود (Song et al., 2017). در نهایت به نظر می‌رسد پارامتر B تأثیری در کاهش مصرف سرمایش ایجاد نمی‌کند و استفاده از پنجره B ۴ تنها ۱ درصد بیشتر نسبت به پنجره B ۱ مصرف انرژی سرمایش را پایین می‌آورد. لذا استفاده از پنجره با ضریب حرارتی بسیار پایین ممکن است هزینه‌های بهسازی را افزایش دهد بی‌آنکه تغییر چشمگیری بر کاهش مصرف انرژی لازم برای سرمایش ایجاد کند. افتراق داده‌ها در نمودار تصویر ۴ مربوط به پارامتر A و B نیز ناشی از عمق متفاوت سایه‌بان در کل حالت‌های بهسازی هستند و حالت‌هایی بدون سایه‌بان در بخش پایینی نمودار قرار می‌گیرند. این موضوع بار دیگر لزوم استفاده از سایه‌بان با عمق مناسب در بهسازی نما در جهت جنوب را یادآوری می‌کند که در پژوهش‌های مشابه نیز ذکر شده است (حقانی، محمدکاری و فیاض، ۱۳۹۶، ۱۷). با این توضیحات پارامترهای A، C و B به ترتیب در کاهش مصرف انرژی لازم برای سرمایش اولویت دارند.

• تأثیر پارامترهای بهسازی بر کاهش انرژی لازم برای گرمایش

بازهٔ تأثیر پارامترهای بهسازی بر کاهش میزان مصرف انرژی لازم برای گرمایش متفاوت است و در بعضی پارامترها از جمله سایه‌بان‌های عمیق تأثیراتی منفی در کاهش مصرف انرژی گرمایشی دارند. مطالعات پیشین نشان می‌دهند کاهش تبادل حرارتی بین پوستهٔ ساختمان و محیط اطراف می‌تواند مصرف انرژی گرمایشی را به شکل مؤثرتری کاهش دهد. در این راستا، بهبود ضریب تبادل حرارتی بدنهٔ نما و سطح بازشو از طریق افزودن عایق و تعویض پنجره‌ها، نخستین گام است (Alonso et al., 2016, 261). داده‌های تصویر ۴ نشان می‌دهند جایگزینی پنجره‌های ناکارآمد با پنجره‌های چندجداره در هر گام حدود ۱۰ درصد مصرف انرژی لازم برای گرمایش را بیشتر کاهش می‌دهد. به گونه‌ای که میزان کاهش مصرف گرمایش با پنجرهٔ B ۴ حدود سه برابر میزان کاهش گرمایش با پنجرهٔ B ۱ است. همچنین در بعضی حالت‌های بهسازی نتایج منفی شده‌اند، اما در بهسازی با پارامترهای B ۳ و B ۴، این حالات رخ نداده است. پارامتر A پس از B، دومین عامل تأثیرگذار بر کاهش مصرف انرژی لازم برای گرمایش است. تصویر ۴ نشان می‌دهد افزایش ضخامت عایق حرارتی از ۱ به ۳ سانتی‌متر مصرف انرژی لازم برای گرمایش را ۱۳ درصد بیشتر کاهش می‌دهد. اما تأثیر این پارامتر در گام‌های بعد افت می‌کند. متوسط کاهش مصرف انرژی لازم برای گرمایش با استفاده از ترکیب پارامترها حدود ۴۳ درصد (خط‌چین بنفش رنگ نمودار تصویر ۴) است و میزان کاهش مصرف با استفاده از عایق حرارتی تقریباً موازی و نزدیک به این میزان است که تأثیر کم این پارامتر را پس از گام سوم نشان می‌دهد.

طبیعتاً پارامتر C با داشتن تأثیرات منفی، نامطلوب ارزیابی شده است. آنچه در بررسی پارامتر سایه‌بان حائز اهمیت است تفاوت محسوس افزایش مصرف انرژی گرمایشی پس از گام دوم است. در نمودارهایی که در تصویر ۵ پارامترهای A و B را بررسی می‌کنند، داده‌هایی که میزان کاهش مصرف انرژی

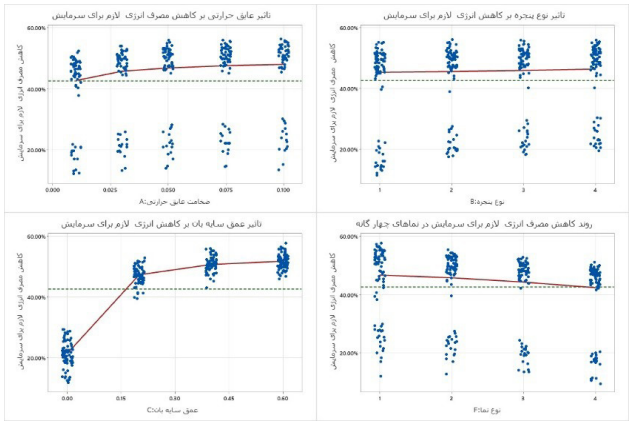
لازم برای گرمایش در آن‌ها منفی هستند مربوط به حالت‌هایی است که در آن‌ها از سایه‌بان C ۴ استفاده شده است. در این حالات استفاده از ضخیم‌ترین عایق نیز نتوانسته است تأثیرات منفی سایه‌بان‌های عمیق بر میزان مصرف انرژی گرمایشی را خنثی کند. مشکلات سایه‌بان‌های عمیق تنها با استفاده از پنجره‌هایی با ضریب تبادل حرارتی بسیار پایین قابل تعدیل است و افزودن عایق ممکن است باعث گرم‌تر شدن فضا به ویژه در نماهایی با ضریب تبادل حرارتی کمتر شود (Drissi Lamrhari & Benhamou, 2018, 1). با این توضیحات پارامترهای A، B و C به ترتیب در کاهش مصرف انرژی لازم برای گرمایش اولویت دارند.

• تأثیر پارامترهای بهسازی بر کاهش انرژی لازم برای روشنایی

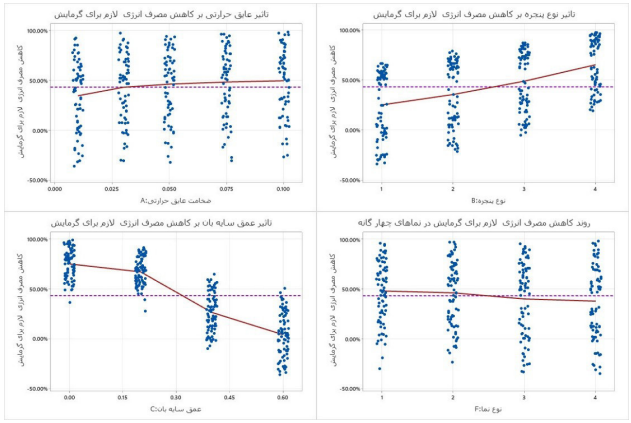
طبیعتاً تنها پارامتر مؤثر بر میزان مصرف انرژی لازم برای روشنایی در این تحقیق، افزایش عمق سایه‌بان است و همان‌طور که انتظار می‌رود، هر چه سایه‌بان عمیق‌تر می‌شود، تأثیری منفی بر مصرف روشنایی در ساختمان دارد. بر اساس نتایج مصرف انرژی لازم برای روشنایی تنها در گام اول با سایه‌بان ۲۰ سانتی‌متری قابل چشم‌پوشی است، اما در گام‌های بعدی که سایه‌بان عمیق‌تر می‌شود میزان مصرف انرژی لازم برای روشنایی به شکلی تصاعدی بالا می‌رود و توصیه نمی‌شود.

• تأثیر پارامترهای بهسازی بر کاهش کل انرژی مصرفی

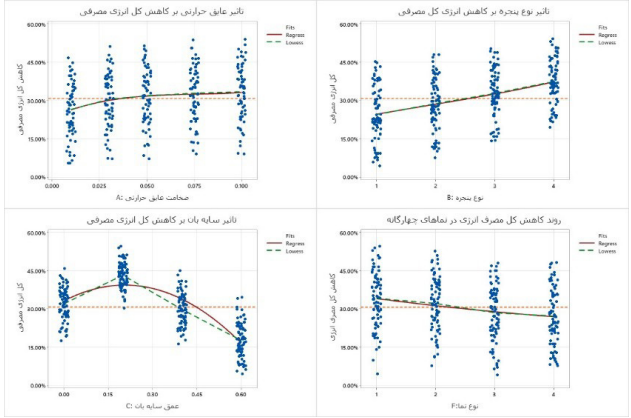
با توجه به نیاز به سرمایش و گرمایش در اقلیم تهران، لازم است تأثیر متقابل پارامترها بر کل انرژی مصرفی دیده شود. طبق نتایج، عمق سایه‌بان بیشترین تأثیر را در کاهش کل انرژی مصرفی دارد به گونه‌ای که با افزایش عمق سایه‌بان به ۲۰ سانتی‌متر، مصرف انرژی نسبت به حالت بدون سایه‌بان بیش از ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر عمق سایه‌بان، این پارامتر به شکل معکوسی باعث بالاتر رفتن مصرف انرژی می‌شود، زیرا بین نیاز به سرمایش و گرمایش تعادل ایجاد نشده است. بنابراین در بهسازی ساختمان‌های اداری شهر تهران، وجود سایه‌بان با عمق مناسب برای بهسازی الزامی است و انتظار می‌رود سهم زیادی از مصرف انرژی را کاهش دهد. در کاهش انرژی مصرفی کل، عملکرد پارامترهای A و B بسیار نزدیک به یکدیگر است. نمودار پارامتر B در تصویر ۵ نشان می‌دهد تعویض پنجره در هر گام میزان مصرف را به شکل مؤثری کاهش می‌دهد. اما هنگامی اولویت تعویض پنجره از عایق حرارتی بالاتر است که از پنجره‌های B ۳ و B ۴ استفاده شود. همچنین باید حداقل از عایق A ۲ با ضخامت ۳ سانتی‌متر استفاده کرد تا میزان کاهش مصرف از متوسط کل کمتر نباشد. استفاده از عایق با ضخامت بالاتر بیشتر برای نمای F ۱ و F ۲ که ضریب تبادل حرارتی بالاتری دارند پیشنهاد می‌شود و استفاده از عایق‌های ضخیم‌تر توصیه نمی‌شود و حتی ممکن است نتایج عکس به دنبال داشته باشد. لذا می‌توان گفت زمانی که نمای ساختمان تبادل حرارتی بالایی با محیط اطراف دارد و از پنجره‌های B ۱ و B ۲ برای بهسازی بهره گیری می‌شود، استفاده از عایق حرارتی نسبت به تعویض پنجره اولویت می‌یابد. در مقابل تأثیری که



تصویر ۳. تأثیر پارامترهای بهسازی بر کاهش انرژی لازم برای سرمایش. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۴. تأثیر پارامترهای بهسازی بر کاهش انرژی لازم برای گرمایش. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۵. تأثیر پارامترهای بهسازی بر کاهش کل مصرف انرژی. مأخذ: نگارندگان.

پنجره‌های B ۳ و B ۴ در کاهش مصرف انرژی کل دارند را نمی‌توان با عایق‌های حرارتی ایجاد کرد و در صورت محدود بودن بودجه در نماهای F ۳ و F ۴ تعویض پنجره با نوع کارآمدتر آن انتخاب مناسب‌تری برای بهسازی به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

امروزه ساختمان‌های موجودی که به دلیل مشکلات نمای ساختمانی ناکارآمد هستند، سهم بزرگی از انرژی را در حوزهٔ ساختمان مصرف می‌کنند. بهسازی نما می‌تواند فرصتی ایجاد کند تا مصرف انرژی در مقیاس شهری به شکل قابل‌توجهی کاهش یابد. نتایج نشان می‌دهند مصرف انرژی کل در ساختمان‌های اداری موجود در شهر تهران پس از بهسازی نما به طور متوسط حدود یک سوم کاهش پیدا می‌کند، اما با انتخاب صحیح گام‌های بهسازی، این میزان می‌تواند به بیش از نصف کاهش پیدا کند. لذا برای دستیابی به بهره‌وری حداکثری، اولویت‌بندی پارامترهای بهسازی و انتخاب مؤثرترین گام‌های بهسازی ضروری است. اولویت پارامترهای بهسازی برای کاهش مصرف سرمایش به ترتیب با سایه‌بان، عایق حرارتی و پنجره است. لازم به ذکر است برای کاهش مصرف انرژی سرمایشی، افزودن سایه‌بان ضروری است و نمی‌توان حتی با استفاده از بهترین عایق و پنجره ولی بدون وجود سایه‌بان، به کاهش مصرف سرمایشی قابل توجهی دست یافت. در مقابل پارامترهای نوع پنجره، عایق حرارتی و سایه‌بان به ترتیب به منظور کاهش مصرف انرژی گرمایشی اولویت دارند. لازم به ذکر است با وجود اینکه بهبود پنجره در هر گام مصرف انرژی گرمایشی را به شکل قابل توجهی کاهش می‌دهد، اما افزایش ضخامت عایق حرارتی آستانه‌ای دارد که گذر از آن بهره‌وری بیشتری در مصرف انرژی ایجاد نمی‌کند. در کاهش مصرف انرژی کل، همان‌گونه که در فرضیهٔ تحقیق پیش‌بینی شده بود، ایجاد تعادل میان نیاز به گرمایش و سرمایش در اقلیم تهران ضروری است و این امر با افزودن سایه‌بان با عمق مناسب در تمامی نماهای جنوبی تحقق می‌یابد و نصب سایه‌بان نسبت به سایر پارامترها اولویت دارد. بخش دوم فرضیهٔ پژوهش که عایق حرارتی و نوع پنجره را در اولویت‌های بعدی بهسازی قرار می‌دهد نیاز به تکمیل دارد، زیرا تعیین اولویت این دو پارامتر، با توجه به عملکرد بسیار نزدیک آن‌ها، به ضریب تبادل حرارتی نمای موجود بستگی دارد. در نماهایی که ضریب تبادل حرارتی بالاتری دارند، برای دستیابی به بهره‌وری بالاتر، افزودن عایق حرارتی نسبت به تعویض پنجره اولویت پیدا می‌کند و اگر سهم بیشتری از سرمایه برای افزودن عایق صرف شود، نتایج مطلوب‌تری در کاهش مصرف کل رقم خواهد زد. در مقابل در نماهایی که ضریب تبادل حرارتی کمتری دارند، تعویض پنجره موجود با پنجره‌ای که ضریب تبادل حرارتی کمتری دارد، اثر بیشتری نسبت به افزودن عایق حرارتی برای کاهش مصرف انرژی کل دارد و توصیه می‌شود سهم بیشتری از سرمایه به تعویض پنجره اختصاص یابد.

پی‌نوشت‌ها

* این مقاله مستخرج از رسالهٔ دکتری «سعاد صریحی» با عنوان «بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های موجود از طریق بهسازی نمای ساختمان (نمونه‌موردی: ساختمان‌های اداری شهر تهران)» است که به راهنمایی دکتر «فاطمه مهدیزاده سراج» و دکتر «محسن فیضی» در سال ۱۴۰۱ در دانشکدهٔ معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران به انجام رسیده است.

۱. Honeybee

۲. LadyBug

۳. در خصوص تعیین ابعاد و ویژگی‌های مدل پایه ۱۰۰ ساختمان‌های اداری موجود شهر تهران به روش خوشه‌بندی سه مرحله‌ای تصادفی نمونه‌برداری شده‌اند. جهت مطالعه بیشتر به رسالهٔ نویسندهٔ اول با عنوان «بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های موجود از طریق بهسازی نما، نمونه موردی: ساختمان‌های اداری شهر تهران» (صریحی، ۱۴۰۱) مراجعه شود.

فهرست منابع

• حقانی، معصومه؛ محمدکاری، بهروز و فیاض، ریما. (۱۳۹۶). بررسی تأثیر سایه‌بان‌های کرکره‌ای در صرفه‌جویی مصرف انرژی ساختمان‌های اداری تهران. *مهندسی مکانیک مدرس*، (۴)۱۷، ۱۷-۲۸.

• حقیر، سعید؛ تشکری، لیلا؛ رضازاده، حمیدرضا و احمدی، فریال. (۱۳۹۹). نماهای زیستی مؤلفه ساماندهی نما و کاهش دی‌اکسید کربن هوا به منظور کاهش گرمایش جهانی (نمونهٔ موردی: خیابان انقلاب تهران). *باغ نظر*، (۱۷)۸۹، ۳۳-۴۴.

• شفیعی‌دستجردی، مسعود؛ صادقی، نگین و رفیعی، مریم. (۱۳۹۹). کمینه‌سازی مصرف انرژی از طریق بهینه‌یابی مصالح پوستهٔ خارجی در مقیاس بلوک شهری، نمونه موردی: بافت فرسودهٔ همت آباد. *باغ نظر*، (۱۷)۹۱، ۹۵-۱۱۰.

• شمشیری، سارا؛ دوازده‌امامی، محسن و عطایی، آبتین. (۱۳۹۶). بررسی عملکرد انتقال انرژی از پنجره‌ها در ساختمان اداری با بهره‌مندی از روشنایی روز. *انرژی ایران*، (۲)۲۰، ۱۲۷-۱۴۶.

• صریحی، سعاد. (۱۴۰۱). *بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های موجود از طریق بهسازی نما (ساختمان‌های اداری شهر تهران)* (رسالهٔ منتشرنشدهٔ دکتری معماری). دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

• مولایی، محمدمهدی؛ پیله‌چی‌ها، پیمان و شادانفر، عطیه. (۱۳۹۸). بهینه‌سازی تناسبات بازشو و جبههٔ نورگیری با رویکرد کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری. *نقش‌جهان*، (۲)۹، ۱۱۷-۱۲۳.

• *نشریهٔ ۵۵، مشخصات فنی عمومی‌کارهای ساختمانی*. (۱۳۹۵). معاونت امور فنی دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.
• وزارت نیرو. (۱۳۹۲). *ترازنامهٔ انرژی ایران سال ۱۳۹۱*. تهران: وزارت نیرو، معاونت برق و امور انرژی. قابل دسترس در: https://isn.moe.gov.ir/
• Alonso, C., Oteiza, I., García-Navarro, J. & Martín-Consuegra, F. (2016). Energy consumption to cool and heat experimental modules for the energy refurbishment of façades. Three case studies in Madrid. *Energy and Buildings*, 126, 252–262.
• Alonso, C., Martín-Consuegra, F., Oteiza, I., Asensio, E., Pérez, G., Martínez, I. & Frutos, B. (2017). Effect of façade surface finish on building energy rehabilitation. *Solar Energy*, 146, 470–483.
• Asadi, E., da Silva, M. G., Antunes, C. H. & Dias, L. (2012). A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. *Building and Environment*, 56, 370–378.
• Aste, N. & Del Pero, C. (2013). Energy retrofit of commercial buildings: Case study and applied methodology. *Energy Efficiency*, 6(2), 407–423.
• Capeluto, I. G. & Ochoa, C. E. (2014). Simulation-based method to determine climatic energy strategies of an adaptable building retrofit facade system. *Energy*, 76, 375–384.
• Carlos, J. S. & Corvacho, H. (2010). Retrofit measures in old elementary school buildings towards energy efficiency. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(4), 567–576.
• Dall'O', G., Galante, A. & Pasetti, G. (2012). A methodology for evaluating the potential energy savings of retrofitting residential building stocks. *Sustainable Cities and Society*, 4(1), 12–21.
• Drissi Lamrhari, E. H. & Benhamou, B. (2018). Thermal behavior and energy saving analysis of a flat with different energy efficiency measures in six climates. *Building Simulation*, 11(6), 1123–1144.
• Harkouss, F., Fardoun, F. & Biwole, P. H. (2018). Multi-objective optimization methodology for net zero energy buildings. *Journal of Building Engineering*, 16(October 2017), 57–71.
• International Energy Agency (IEA). (2013). *Modernising Building Energy Codes*. Retrieved from https://webstore.iea.org/policy-pathway-modernising-building-energy-codes-2013.
• Luddeni, G., Krarti, M., Pernigotto, G. & Gasparella, A. (2018). An analysis methodology for large-scale deep energy retrofits of existing building stocks: Case study of the Italian office building. *Sustainable Cities and Society*, 41, 296–311.
• Radwan, A. F., Hanafy, A. A., Elhelw, M. & El-Sayed, A. E. H. A. (2016). Retrofitting of existing buildings to achieve better energy-efficiency in commercial building case study: Hospital in Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 55(4), 3061–3071.
• Reinhart, C. F., Jakubiec, J. A. & Ibarra, D. (2013). Definition of a Reference Office for Standardized Evaluations of Dynamic Façade and Lighting Technologies. *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Chambéry, France, August 26-28, 3645–3652.
• Rey, E. (2004). Office building retrofitting strategies: Multicriteria approach of an architectural and technical issue. *Energy and Buildings*, 36(4), 367–372.
• Rosti, B., Omidvar, A. & Monghasemi, N. (2020). Optimal insulation thickness of common classic and modern exterior walls in different climate zones of Iran. *Journal of Building Engineering*, (27).
• Rysanek, A. M. & Choudhary, R. (2013). Optimum building energy retrofits under technical and economic uncertainty. *Energy and Buildings*, 57, 324–337.
• Sarihi, S. & Derakhshan, Z. (2018). Advanced Integrated Facades, a New Solution to Energy Concerns. *Conference Proceedings of the International Conference in Engineering, architecture and urban management*. Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
• Sarihi, S., Mehdizadeh Saradj, F. & Faizi, M. (2021). A Critical Review of Façade Retrofit Measures for Minimizing Heating and Cooling Demand in Existing Buildings. *Sustainable Cities and Society*, 64, 102525.
• Semprini, G., Marinosci, C., Ferrante, A., Predari, G., Mochi, G., Garai, M. & Gulli, R. (2016). Energy management in public institutional and educational buildings: The case of the school of engineering and architecture in Bologna. *Energy and Buildings*, 126(2016), 365–374.
• Song, X., Ye, C., Li, H., Wang, X. & Ma, W. (2017). Field study on energy economic assessment of office buildings envelope retrofitting in southern China. *Sustainable Cities and Society*, 28, 154–161.
• Stevanovic, S. (2013). Optimization of passive solar design strategies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 177–196.
• Tovarovic, J. C., Ivanovic-Šekularac, J. & Šekularac, N. (2017). Renovation of existing glass facade in order to implement energy efficiency and media facade. *Energy and Buildings*, 152, 653–666.
• - Wang, Z., Ding, Y., Geng, G. & Zhu, N. (2014). Analysis of energy efficiency retrofit schemes for heating, ventilating and air-conditioning systems in existing office buildings based on the modified bin method. *Energy Conversion and Management*, 77, 233–242.
• - Wilkinson, S. (2012). Analysing sustainable retrofit potential in premium office buildings. *Structural Survey*, 30(5), 398–410.
• - Zhou, Z., Zhang, S., Wang, C., Zuo, J., He, Q., & Rameezdeen, R. (2016). Achieving energy efficient buildings via retrofitting of existing buildings: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3605–3615.

COPYRIGHTS
Copyright for this article is retained by the authors with publication rights granted to Manzar journal. This is an open access article disributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نحوهٔ ارجاع به این مقاله
صریحی، سعاد؛ فیضی، محسن و مهدیزاده سراج، فاطمه. (۱۴۰۱). اولویت راهکارهای بهسازی نما به منظور بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های اداری موجود شهر تهران. *منظر*، ۱۴(۵۹)، ۳۰-۳۹.

DOI: 10.22034/MANZAR.2021.312873.2163
URL : http://www.manzar-sj.com/article_141945.html