صفحات ۳۴-۱۹

تحلیل‌های اقتصادی و ارزیابی میزان مصرف انرژی بر اساس نوع و نسبت پنجره‌ها با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی
(مطالعه موردی: یک واحد مسکونی نمونه در شهر تهران)*

دکترعلیرضا کریم پور**، دکتر داراب دیبا***، دکتر ایرج اعتصام****

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۳ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹

چکیده

غالب ساختمان‌های امروزی به علت عدم تطابق با استانداردهای مصرف، ناگزیر از مصرف بیش‌ازحد انرژی برای ایجاد شرایط آسایش حرارتی می‌باشند. پنجره‌ها در ساختمان، کارآمدی انرژی و آسایش محیطی را تحت تأثیر قرارداده و درعین‌حال بزرگ‌ترین عناصر اتلاف حرارتی نیز محسوب می‌گردند. در این پژوهش بر پایه روش تحقیق «شبیه‌سازی و مدل‌سازی» و «استدلال منطقی»، نخست یک ساختمان مسکونی نمونه در شهر تهران چندین‌بار با ویژگی‌های یکسان و تنها با تفاوت در نوع و نسبت پنجره شبیه‌سازی گردید و پنجره بهینه ازنظر میزان کارآمدی انرژی مشخص شد. در گام بعد، هزینه‌های انرژی و دوره بازگشت سرمایه، یک‌بار در مدل ساختمانی نمونه و بار دیگر در حالتی که پنجره بهینه بر روی آن ساختمان شبیه‌سازی‌شده بود، محاسبه گردید. نتایج نشان‌می‌دهد که تنها با استفاده از پنجره‌هایی با کارایی بالا و نسبت بهینه، مصرف انرژی تا ۲۰/۳٪ کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به قیمت فعلی سوخت در ایران و دوره زمانی۱۷/۸ساله برای بازگشت سرمایه که از تحلیل‌های اقتصادی حاصل شد، هزینه‌های اولیه اضافی با اعمال سیاست‌های پیشنهادی جبران خواهد شد.

واژه‌های کلیدی

شبیه‌سازی مصرف انرژی، نوع پنجره، نسبت پنجره به دیوار، هزینه انرژی، دوره بازگشت سرمایه.

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری نگارنده اول تحت عنوان «بررسی تاثیر مولفه‌های طراحی معماری بر میزان مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی (مورد مطالعه: شهر تهران)» در رشته معماری به راهنمایی نگارنده دوم و مشاوره نگارنده سوم می‌باشد.

** دانشجوی دکتری معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران. (مسئول مکاتبات)
Email: alireza.karimpour@yahoo.com

*** استاد دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

**** استاد دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

© 2019 IAU
ISSN 17359562

مقدمه

محدودیت منابع فسیلی و مصرف بالای انرژی در دهه‌های اخیر توجهات بسیاری را به خود جلب نموده است. مصرف انرژی در ایران به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بالاتر از استانداردهای جهانی است و مهم‌ترین دلیل آن وضعیت نامطلوب ساختمان‌ها از حیث مصرف انرژی است (ابراهیم پور و محمدکاری،۱۳۹۰). ازآنجاکه بالاترین سهم مصرف انرژی در بین بخش‌های مصرف‌کننده مربوط به حوزه ساختمان و مسکن با حدود ۴۰٪ از کل انرژی است، بهینه‌سازی مصرف انرژی در این بخش منطقی و ضروری به نظر می‌رسد (خان‌محمدی و همکاران، ۱۳۹۲). در سال‌های اخیر، واحدهای مسکونی رشد چشمگیری را ـ به‌خصوص در شهر تهران به‌عنوان پرجمعیت‌ترین شهر ایران و طبیعتاً جایی که بیشترین حوزه مصرف انرژی در بخش مسکونی را داراست ـ داشته است[1] (شیرازیان و همکاران، ۱۳۹۳) که در کنار حذف یارانه‌های انرژی و افزایش قیمت حامل‌های انرژی، بر اهمیت صرفه‌جویی انرژی در ساختمان‌ها افزوده است (نصراللهی، ۱۳۹۰).

یکی از مؤلفه‌های طراحی معماری که میزان مصرف انرژی و شرایط آسایش محیطی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، پوشش حرارتی ساختمان است و پنجره به‌عنوان یکی اجزای اصلی پوشش حرارتی، نقش حساسی در صرفه‌جویی انرژی ایفا می‌نماید (دقیق و مشتاق، ۱۳۸۲)؛ چراکه حدود ۳۰٪ از کل اتلاف حرارتی ساختمان از پنجره‌ها صورت می‌گیرد (شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت، ۱۳۹۴). بنابراین ارزیابی نوع و نسبت بهینه پنجره در مرحله طراحی معماری، نقش مهمی در انرژی کارآمدی و بهبود کیفیت محیط داخلی ایفاء می‌کند (حبیب و همکاران، ۱۳۹۳). لذا هدف اصلی این پژوهش ارائه ابزار و رهنمودهایی برای طراحان در راستای گزینش نوع و نسبت بهینه پنجره برای ساختمان در فاز طراحی و مطالعه تأثیر آن بر هزینه‌های انرژی و ساخت و همین‌طور دیگر جنبه‌های اقتصادی متأثر از آن است. این مطالعه با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، در آغاز تأثیر نوع و نسبت پنجره به دیوار[2] را بر میزان مصرف انرژی ساختمان موردبررسی و تحلیل قرار داده و درنهایت میزان صرفه‌جویی و بازگشت سرمایه[3] ناشی از اجرای راهکارهای بخش اول پژوهش را از منظر اقتصادی محاسبه و تحلیل می‌نماید.

روش پژوهش

در این مقاله یک ساختمان مسکونی نمونه از میان نمونه‌های رایج شهر تهران انتخاب‌شده و سپس اقدامات بهینه‌سازی میزان مصرف انرژی با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، روی آن انجام‌شده است. ویژگی بهینه‌سازی در این پژوهش شامل صرفه‌جویی در مصرف انرژی کل ساختمان است که برای دو مشخصه اصلی پوشش حرارتی ساختمان یعنی نوع و نسبت بهینه پنجره، با استفاده از شبیه‌سازی عددی محاسبه‌شده‌اند. روش تحقیق بر اساس هدف پژوهش از نوع «کاربردی» و ازنظر رویکرد اتخاذشده و ماهیت از نوع «شبیه‌سازی و مدل‌سازی» و «استدلال منطقی» است. در ابتدای پژوهش، مطالعاتی بر مبنای تحقیقات موجود، صورت گرفته و چهار نوع از پنجره‌های شناخته‌شده و موجود در کشور که یکی از آنها تک جداره و سه تای دیگر سه جداره می‌باشند، به همراه ویژگی‌های نوری و حرارتی آنها معرفی‌شده‌اند. در گام اول پژوهش این چهار نوع پنجره در چهار جهت‌گیری اصلی و با تغییر نسبت پنجره به دیوار از ۵ تا ۵۵٪ بر روی ساختمان مسکونی نمونه شبیه‌سازی گردیدند و پس از محاسبه میزان مصرف انرژی آنها، نسبت بهینه پنجره برای هر یک از انواع پنجره مشخص گردید. در گام بعدی پنجره با نسبت بهینه در سه جهت‌گیری بر روی مدل ساختمانی قرار گرفت و این بار تنها نسبت پنجره در یک جهت‌گیری از ۵ تا ۵۵٪ تغییر یافت. تا میزان مصرف انرژی و به‌تبع آن درصد صرفه‌جویی در انرژی برای هر جهت به‌طور مجزا به دست آید. سپس به‌منظور حصول اطمینان از وجود صرفه اقتصادی در کنار صرفه‌جویی انرژی پنجره بهینه، در بخش تحلیل اقتصادی پژوهش، ساختمان جدیدی مشابه ساختمان قبلی و فقط با یک عامل متفاوت که همان نوع و نسبت بهینه پنجره است، طراحی شد. سپس دو ساختمان ازنظر هزینه انرژی، دوره بازگشت سرمایه و نرخ بهره‌وری داخلی باهم مقایسه شدند و درنهایت تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از مقایسه تطبیقی آنها با داده‌های اولیه پژوهش و روش‌های آماری استدلال منطقی صورت گرفت.

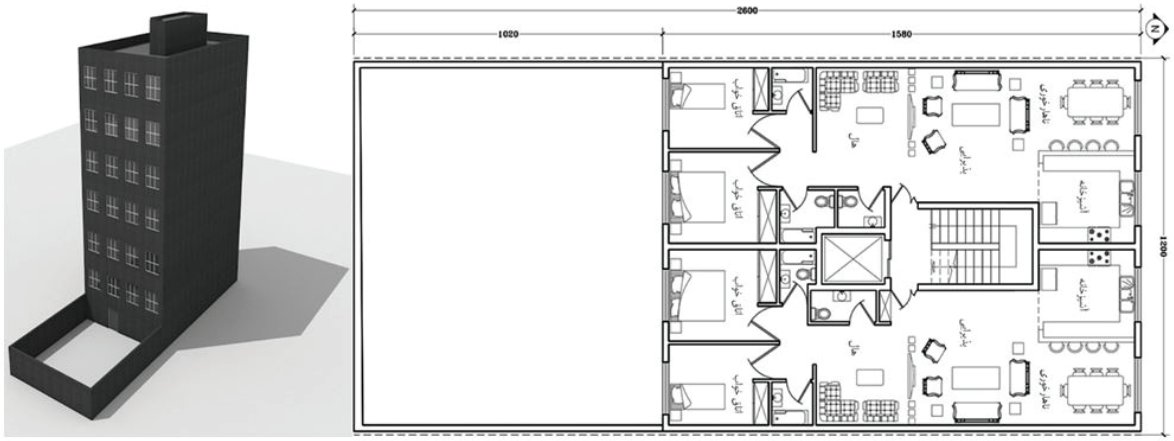
پیشینه پژوهش

در حال حاضر مطالعات زیادی در مورد تأثیر نوع و نسبت بهینه پنجره به دیوار و ویژگی‌های حرارتی ناشی از آن در ساختمان انجام‌شده است. ییلدیز و همکارانش به کمک نرم‌افزار EnergyPlus، تأثیر نسبت پنجره به دیوار و نوع شیشه و جهت‌گیری را بر مصرف انرژی یک مدرسه در اقلیم گرم و مرطوب بررسی نمودند (Yildiz et al., 2011). الدوساری و همکارانش الگوهای مصرف انرژی را در سه ساختمان ویلایی و سه آپارتمان مسکونی موردبررسی قراردادند. شبیه‌سازی انرژی سالانه این ساختمان‌ها به کمک نرم‌افزار IESVE و تحلیل میزان صرفه‌جویی انرژی پنجره‌های کارآمد، آفتاب‌گیرها و منابع انرژی تجدیدپذیر خانگی صورت گرفت. بر طبق نتایج شبیه‌سازی‌ها کاهش مصرف انرژی بین ۲۱٪ تا ۳۷٪ با بهره‌گیری از پنجره‌های دوجداره، آفتاب‌گیر خارجی و نصب سیستم تولید برق فتوولتائیک در محل

حاصل خواهد شد (Aldossary et al., 2014). غیایی و همکارانش با توجه به تقاضای انرژی بالای ساختمان‌های اداری بلندمرتبه در ایران، همچنین شناخت پوسته حرارتی ساختمان به‌عنوان یکی از اجزای مؤثر در صرفه‌جویی انرژی، نسبت پنجره به دیوار و جهت‌گیری یک نوع پنجره ثابت را در این ساختمان‌ها با نرم‌افزار eQUEST تحلیل نمودند. نتایج حاکی از آن است که ۲۰٪ کاهش در نسبت پنجره می‌تواند مصرف انرژی سالانه ساختمان مبنا را تا ۱۷٪ کاهش دهد (Ghiai et al., 2014). یانگ و همکارانش با بهره‌گیری از نرم‌افزار شبیه‌سازی DEST تقاضای انرژی گرمایش و سرمایش سالانه یک ساختمان اداری را در سه شهر نمونه از اقلیم گرم و خشک در شرایط مختلف نسبت پنجره، نوع پنجره و نوع سیستم تهویه مطبوع محاسبه نمودند. درنتیجه‌گیری این مطالعه آمده است که با افزایش نسبت پنجره به دیوار در پنجره‌های کم گسیل، مصرف انرژی کل خصوصاً در جهات شرق و غرب افزایش می‌یابد (Yang et al., 2015). تأثیر قیمت حامل‌های انرژی بر اقدامات صرفه‌جویانه انرژی در ساختمان‌ها نیز در پژوهش‌های اقتصادی دهه‌های اخیر به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای رو به افزایش است. سلطانی و یوسفی‌کیا تأثیر استفاده از پنجره‌های با کارایی بالای حرارتی، بر کاهش سرمایه‌گذاری اولیه تأسیسات حرارتی ساختمان را موردمطالعه قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد به کمک این پنجره‌ها، از هزینه اجرایی تأسیسات حرارتی ساختمان تا ۴۷٪ کاسته می‌شود (سلطانی و یوسفی‌کیا،۱۳۸۴، ۶). هملین و زمورنو، پس از مطالعه نسبت‌های مختلف پنجره در یک ساختمان مسکونی یک طبقه با استفاده از نرم‌افزار TRNSYS، به بررسی و تحلیل تأثیر پنجره‌های کارآمد در کاهش مصرف و هزینه‌های انرژی ساختمان پرداخته‌اند (Hamelin & Zmeureanu, 2014, 96). به‌طورکلی سابقه تحقیق نشان می‌دهد که فقط بخش کمی از مطالعات به بررسی توأمان نوع و نسبت پنجره بهینه در ساختمان و تحلیل‌های اقتصادی مترتب بر آن پرداخته‌اند، که بیشتر آن‌هم بر ساختمان‌های عمومی و اداری متمرکزشده‌اند.

مشخصات مدل ساختمانی نمونه

ساختمان نمونه با توجه به گستردگی شهر تهران یک آپارتمان ۶ طبقه جنوبی است که از میان ساختمان‌های مسکونی متعارف در این شهر به‌منظور شبیه‌سازی و تحلیل تأثیر نوع و نسبت پنجره بر میزان مصرف انرژی، انتخاب گردیده است. مساحت زمین ۳۱۲ مترمربع و مساحت هر طبقه ۱۸۹ مترمربع است.[۴] همچنین تمامی اجزای پوشش حرارتی ساختمان شامل دیوارهای خارجی، بام و قاب پنجره‌ها، دارای عایق حرارتی است (شکل ۱). با توجه به اینکه محدوده آسایش حرارتی شهر تهران در بازه $20/4\ ^{c}$ تا $26/8\ ^{c}$ است (Nasrollahi et al., 2013)، فرض بر آن است که با عبور دمای محیط از این حدود، تجهیزات مکانیکی گرمایشی و سرمایشی ساختمان استفاده خواهند شد. همچنین ظرفیت حرارتی و انرژی گرمایشی ناشی از تجهیزات ساختمان هم در محاسبات در نظر گرفته‌شده است. مشخصات ساختمان نمونه در جدول (۱) آمده است.



شکل ۱. پلان تیپ طبقات و پرسپکتیو ساختمان مسکونی نمونه

جدول ۱. مشخصات مدل ساختمانی نمونه

مشخصات	توضیحات
مساحت زمین / زیربنای هر طبقه (مترمربع)	۳۱۲ (۱۲ x ۲۶ متر) / ۱۸۹
جهتگیری	جنوبی
تعداد طبقات و تعداد واحدهای مسکونی	۶ طبقه ـ ۱۰ واحد (مساحت هر واحد ۸۶ مترمربع)
ارتفاع طبقات (متر)	۲/۸۰ (کف تا زیر سقف ـ به انضمام ۳۰ سانتیمتر ضخامت سقف)
مساحت دیوارهای خارجی هر طبقه (مترمربع)	۳۳/۶ (دیوارهای شمالی و جنوبی) ـ ۴۴/۲ (دیوارهای شرقی و غربی)
ضریب کل هدایت حرارتی دیوارهای خارجی (W/m²K) UValue[5]	۰/۴۶ (دیوارها شامل ۲۵ سانتیمتر بلوک سفالی و ۵ سانتیمتر عایق پلی استایرن است)
ضریب کل هدایت حرارتی بام (W/m²K) UValue	۰/۶۱ (بام از دال بتنی مسلح)
تراکم ساکنین / نرخ تغییر هوا (ACH)[6]	۱۵ مترمربع برای هر نفر / ۰/۶ در ساعت
میزان مصرف انرژی کل (kWh/m²a)	۵۲/۸

روش‌شناسی شبیه‌سازی

شبیه‌سازی انرژی، علم برآورد میزان بهره‌وری انرژی ساختمان است و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی از طریق مدل‌سازی دقیق استراتژی‌های گوناگون طراحی، به کاهش هزینه و مصرف انرژی ساختمان می‌انجامند (غیائی و همکاران، ۱۳۹۲). در این پژوهش یک روش دومرحله‌ای برای نیل به هدف پژوهش مدنظر قرارگرفته است. در مرحله اول جهت تعیین نوع و نسبت بهینه پنجره در ساختمان نمونه از نرم‌افزار VisualDOE v.4.0 که برنامه‌ای کارآمد، مرجع و متعارف درزمینهٔ شبیه‌سازی انرژی است، استفاده‌شده است.[7] این نرم‌افزار محاسبات انرژی کل[8] را برای انواع پنجره و سیستم‌های تهویه مطبوع ساختمان، در بازه‌های زمانی مورد درخواست، انجام می‌دهد. در مرحله دوم با استفاده از نرم‌افزار مشاور اقتصادی OekoRat v.2.3 تحلیل‌های اقتصادی از طریق مقایسه میان هزینه انرژی، دوره بازگشت سرمایه و نرخ بهره‌وری داخلی[9] ساختمان نمونه در حالت عادی و حالتی که نوع و نسبت بهینه پنجره بر روی آن شبیه‌سازی‌شده است، صورت می‌گیرد.

ارزیابی نوع و نسبت پنجره‌ها بر میزان مصرف انرژی ساختمان نمونه

تعیین داده‌ها (مشخصات پنجره‌ها)

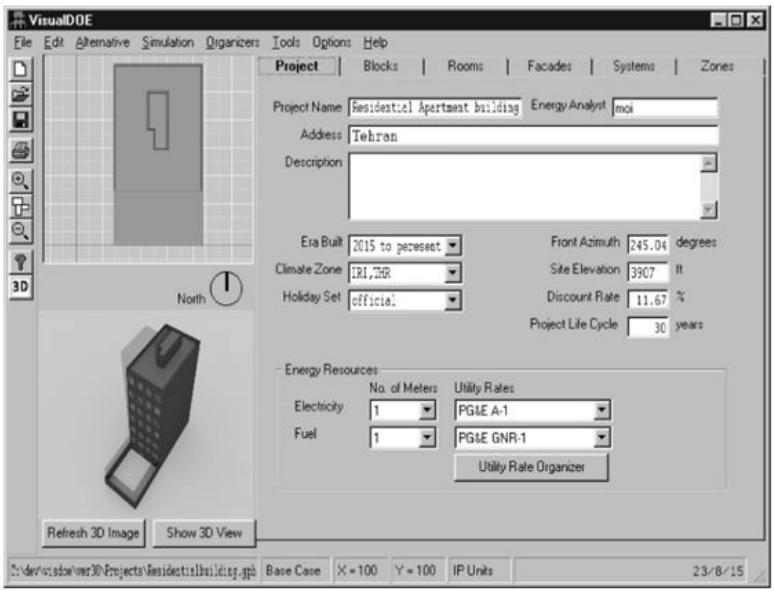
نوع شیشه پنجره، تعداد جداره‌ها و نسبت مساحت پنجره به دیوار، ویژگی‌های کلیدی در طراحی پنجره ساختمان می‌باشند؛ چراکه می‌توانند بر میزان انتقال نور و جذب حرارت خورشیدی فضای داخلی تأثیر بگذارند. برای تعیین نوع پنجره بهینه، چهار نوع پنجره مختلف از میان انواع رایج آنها انتخاب گردید (جدول ۲). پنجره‌ها شامل: پنجره تک جداره معمولی شفاف، پنجره سه جداره معمولی شفاف، پنجره سه جداره کم گسیل و پنجره سه جداره انعکاسی می‌باشند.[10] هر سه نوع پنجره سه جداره[11] دارای ضخامت ۶ میلی‌متر در جداره‌های بیرونی و درونی و ۴ میلی‌متر در جداره میانی هستند و حجم میانی جداره‌ها با ۸ میلی‌متر گاز آرگون پرشده است.[12] مساحت اولیه پنجره‌ها ۱۵۹/۶ مترمربع (هر طبقه ۲۶/۶ مترمربع) و ارتفاع آنها ۱/۹۰ متر لحاظ گردیده است. همچنین قاب کلیه پنجره‌ها UPVC و ضریب کل هدایت حرارتی آن معادل W/m^2K ۳/۱ (Pilkington, 2015) است، پنجره‌ها فاقد هرگونه آفتاب‌گیر بوده و قرارگیری پنجره‌ها بدون زاویه نسبت به نمای ساختمان برای شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته‌شده است. از طریق این داده‌ها، شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار VisualDOE طی یک بازه زمانی یک‌ساله (شروع از ماه ژوئن) به‌منظور تحلیل انواع پنجره و نسبت بهینه آنها برای کل ساختمان، انجام‌گرفته است (شکل ۲).

ارزیابی کارآمدی انرژی و تعیین نسبت بهینه پنجره‌ها بر اساس متغیرها

در این بخش میزان مصرف انرژی کل برای چهار نوع پنجره با نسبت‌های مختلف پنجره به دیوار در جهات شمال، جنوب، شرق و غرب به کمک نرم‌افزار، شبیه‌سازی گردید و میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی پنجره‌های سه جداره باهم و با پنجره مرجع (پنجره تک جداره شفاف) مقایسه شد تا معیاری برای گزینش نوع و نسبت بهینه پنجره حاصل گردد. در اینجا دو مرحله برای شبیه‌سازی‌ها در راستای

جدول ۲. مشخصات پنجره‌ها (Source: Pilkington, 2015)

نوع پنجره	ضخامت جداره‌ها (mm)	ضخامت گاز آرگون بین جداره‌ها (mm)	VT [۱۳] (ضریب وضوح دید) (٪)	SC [۱۴] (ضریب سایه) (٪)	SHGC [۱۵] (ضریب جذب حرارت خورشیدی) (٪)	UValue (ضریب کل هدایت حرارتی پنجره) (W/m^2K)
تک جداره شفاف	۸	_	۰/۸۹	۰/۹۳	۰/۸۶	۶/۳۱
سه جداره شفاف	۶ _ ۴ _ ۶	۸	۰/۷۵	۰/۷۹	۰/۶۸	۱/۶۴
سه جداره کم گسیل	۶ _ ۴ _ ۶	۸	۰/۷۱	۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۷۱
سه جداره انعکاسی	۶ _ ۴ _ ۶	۸	۰/۵۳	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۸۳

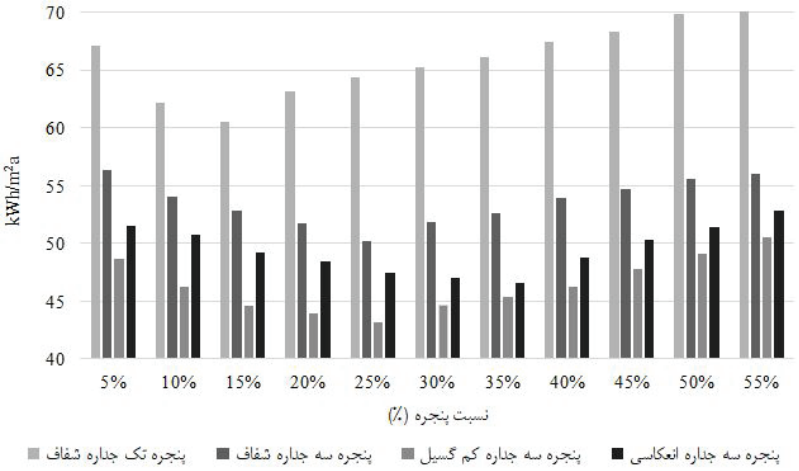


شکل ۲. محیط نرم‌افزار VisualDOE و نحوه وارد کردن داده‌ها و شبیه‌سازی

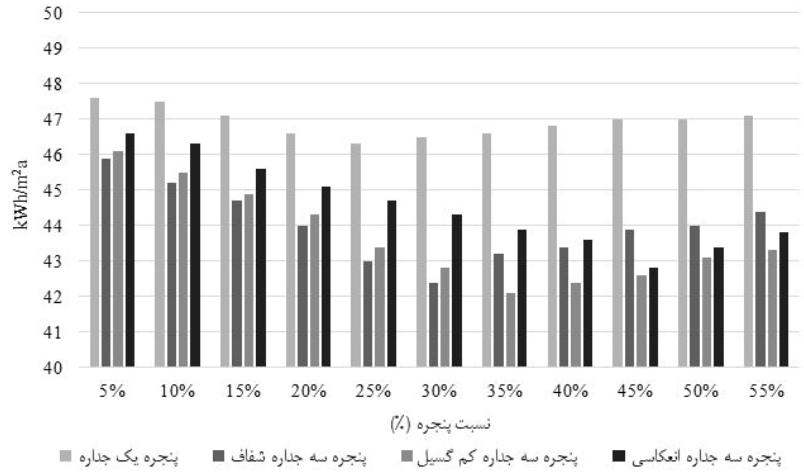
نیل به هدف پژوهش در نظر گرفته شـد. در مرحله اول نسبت پنجره به دیوار در ساختمان نمونه در چهار جهت اصلی با درصد یکسان از ۵ تا ۵۵٪ [۱۶] تغییر یافت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مرحله اول در شکل (۳) نشان داده‌شده است.

در مرحله دوم متغیر نسبت پنجره به‌طور جداگانه در هر جهت بررسی شـد. بدین گونه که در هر نمونه نسـبت متفاوتی از مسـاحت پنجره در یک جهت‌گیری وجود دارد و سـایر دیوارها از نسبت پنجره بهینه به‌دسـت‌آمده در مرحله اول بهره می‌برند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مرحله دوم در شکل‌های ۴تا ۷ نشان داده‌شده است.

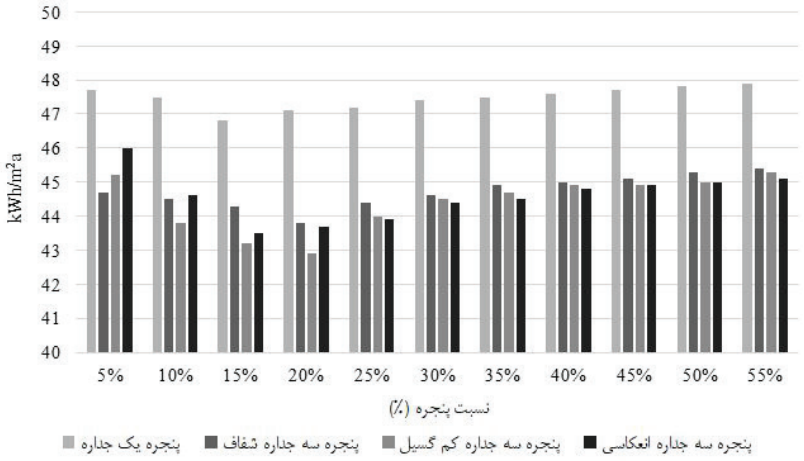
شبیه‌سازی‌ها نشان داد (شکل ۳) که نسبت بهینه پنجره با تغییر نوع آن، تغییر خواهد کرد. نتایج حاکی از آن اسـت که با افزایش نسـبت پنجره در همه جهات، تقاضای انرژی کل از نسبت ۵ تا ۱۵٪ در پنجره تک جداره کاهش‌یافته و از نسـبت ۱۵ تا ۵۵٪ انرژی افزایش می‌یابد. در پنجره‌های سـه جداره شفاف و سـه جداره کم گسیل، با افزایش نسبت پنجره از ۵ تا ۲۵٪ مصرف انرژی کل ساختمان کاهش می‌یابد، اما از نسبت ۲۵ تا ۵۵٪ این میزان افزایش خواهد یافت. در پنجره سه جداره انعکاسی نیز با افزایش نسبت پنجره از ۵ تا ۳۵٪ مصرف انرژی کل سـاختمان کاهش‌یافته و از نسبت ۳۵ تا ۵۵٪ این میزان افزایش می‌یابد. بنابراین اگر سـاختمان دارای نسـبت‌های مسـاحت پنجره یکسـان در همه جهات باشد، نسـبت بهینه پنجره برای دستیابی به حداقل میزان مصرف انرژی کل، بسته به نوع پنجره می‌تواند بین ۱۵ تا ۳۵٪ مساحت کل دیوار متغیر باشد که این نسبت برای پنجره‌های تک



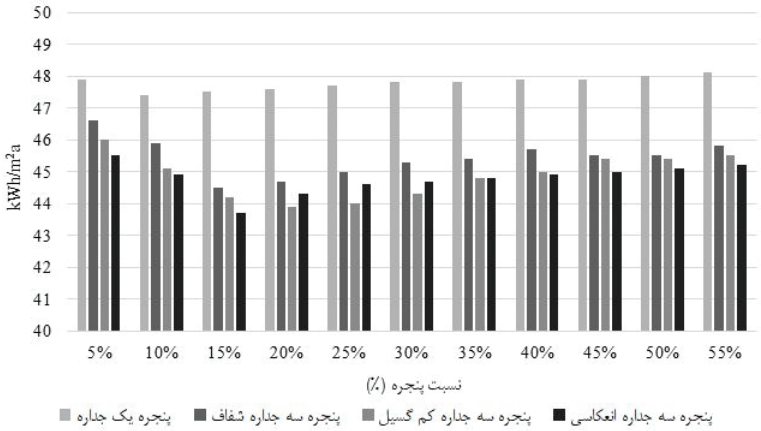
شکل ۳. میزان مصرف انرژی کل ساختمان با نوع و نسبت مختلف مساحت پنجره در تمام جهات
(بر اساس نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی)



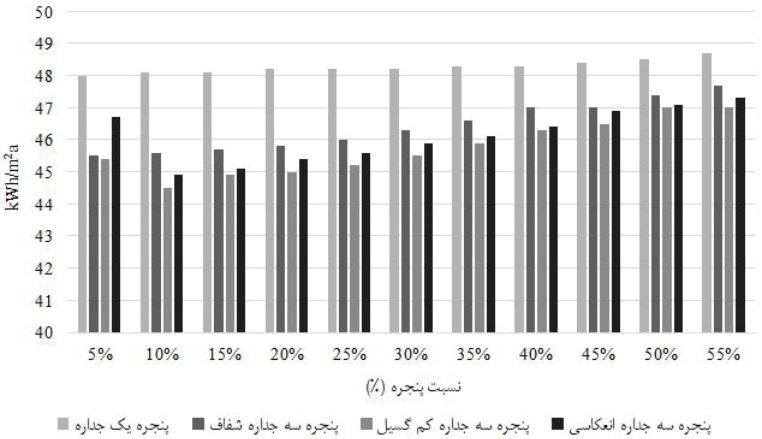
شکل ۴. میزان مصرف انرژی کل ساختمان با نوع و نسبت مختلف مساحت پنجره در جهت جنوب
(بر اساس نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی)



شکل ۵. میزان مصرف انرژی کل ساختمان با نوع و نسبت مختلف مساحت پنجره در جهت شرق
(بر اساس نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی)



شکل ۶. میزان مصرف انرژی کل ساختمان با نوع و نسبت مختلف مساحت پنجره در جهت غرب
(بر اساس نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی)



شکل ۷. میزان مصرف انرژی کل ساختمان با نوع و نسبت مختلف مساحت پنجره در جهت شمال
(بر اساس نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی)

جداره، سه جداره شفاف، سه جداره کم گسیل و سه جداره انعکاسی به ترتیب ۱۵٪، ۲۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪ است. همچنین در میان تمام انواع پنجره نسبت ۱۰۰٪ برای هر چهار جهت بیشترین میزان مصرف انرژی را به دنبال خواهد داشت.

نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد در صورت استفاده از پنجره‌های سه جداره، میزان مصرف انرژی در مقایسه با پنجره تک جداره به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای، بین ۲۵ تا ۴۰٪، کاهش خواهد یافت. شکل (۴) میزان مصرف انرژی کل ساختمان با نسبت‌های مختلف مساحت پنجره در جهت جنوب و دارای نسبت پنجره بهینه (۱۵ تا ۳۵٪ برای انواع مختلف پنجره) در دیگر جهات را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۴، در صورت استفاده از پنجره تک جداره و از نسبت ۵ تا ۲۵٪، میزان مصرف انرژی کل کاهش و از ۲۵ تا ۵۵٪، این میزان افزایش خواهد یافت. در حالت استفاده از پنجره سه جداره شفاف، میزان مصرف انرژی کل با افزایش نسبت پنجره از ۵ تا ۳۰٪، کاهش‌یافته و پس‌ازآن این میزان افزایش می‌یابد. همچنین در پنجره سه جداره کم گسیل میزان مصرف انرژی کل از نسبت ۵ تا ۳۵٪ کاهش و از ۳۵٪ به بعد، افزایش می‌یابد. در حالت استفاده از پنجره سه جداره انعکاسی نیز میزان مصرف انرژی کل از نسبت ۵ تا ۴۵٪ کاهش و از ۴۵ تا ۵۵٪ افزایش می‌یابد. درنتیجه اگر یک ساختمان از درصد پنجره بهینه در دیگر جهات بهره ببرد، در جهت جنوب نسبت ۲۵٪ برای پنجره تک جداره، ۳۰٪ برای پنجره سه جداره شفاف، ۳۵٪ برای پنجره سه جداره کم گسیل و نسبت ۴۵٪ برای پنجره سه جداره انعکاسی، نسبت بهینه و مطلوبی برای کارآمدی انرژی خواهد بود. لازم به ذکر است در حالت استفاده از پنجره تک جداره، بیشترین صرفه‌جویی در

مصرف انرژی زمانی حاصل می‌شود که نسبت پنجره حداقل باشد؛ زیرا این پنجره امکان نفوذ نور طبیعی بیشتری را در مقایسه با انواع دیگر پنجره‌ها به فضای داخلی فراهم می‌آورد، اما درعین‌حال نسبت پنجره بزرگ‌تر، جذب حرارت را در این نوع پنجره افزایش خواهد داد. در حالت استفاده از نسبت‌های پنجره بزرگ‌تر، پنجره سه جداره کم گسیل و سه جداره انعکاسی عملکرد بهتری داشته زیرا میزان جذب حرارت از طریق آنها بسیار کمتر است.

شکل ۵ میزان مصرف انرژی کل ساختمان با نسبت‌های مختلف مساحت پنجره در جهت شرق و دارای نسبت پنجره بهینه (۱۵ تا ۳۵٪ برای انواع مختلف پنجره) در دیگر جهات را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۵)، در صورت استفاده از پنجره تک جداره و سه جداره انعکاسی از نسبت ۵ تا ۱۵٪، میزان مصرف انرژی کل کاهش و از ۱۵ تا ۵۵٪، این میزان افزایش خواهد یافت. همچنین در پنجره‌های سه جداره شفاف و سه جداره کم گسیل، میزان مصرف انرژی کل با افزایش نسبت پنجره از ۵ تا ۲۰٪، کاهش‌یافته و پس‌ازآن این میزان افزایش می‌یابد. درنتیجه باوجود درصد پنجره بهینه در دیگر جهات، نسبت بهینه پنجره در جهت شرق برای پنجره‌های تک جداره و سه جداره انعکاسی ۱۵٪ و برای پنجره‌های سه جداره شفاف و سه جداره کم گسیل، ۲۰٪ است.

شکل ۶ میزان مصرف انرژی کل ساختمان با نسبت‌های مختلف مساحت پنجره در جهت غرب و دارای نسبت پنجره بهینه در دیگر جهات را نشان می‌دهد. بر اساس شکل۶، در حالت استفاده از پنجره تک جداره و از نسبت ۵ تا ۱۰٪، میزان مصرف انرژی کل کاهش و از ۱۰ تا ۵۵٪، این میزان افزایش خواهد یافت. در صورت استفاده از پنجره‌های سه جداره شفاف و سه جداره انعکاسی، میزان مصرف انرژی کل با افزایش نسبت پنجره از ۵ تا ۱۵٪، کاهش‌یافته و پس‌ازآن این میزان افزایش می‌یابد. در صورت به‌کارگیری پنجره سه جداره کم گسیل نیز میزان مصرف انرژی کل از نسبت ۵ تا ۲۰٪ کاهش و سپس افزایش می‌یابد؛ بنابراین در حالتی که دیگر جهات از نسبت بهینه پنجره برخوردار باشند، نسبت بهینه پنجره در جهت غرب برای پنجره تک جداره ۱۰٪، برای پنجره‌های سه جداره شفاف و سه جداره انعکاسی ۱۵٪ و برای پنجره سه جداره کم گسیل، ۲۰٪ خواهد بود.

شکل ۷ میزان مصرف انرژی کل ساختمان با نسبت‌های مختلف مساحت پنجره در جهت شمال و دارای نسبت پنجره بهینه (۱۵ تا ۳۵٪ برای انواع مختلف پنجره) در دیگر جهات را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۷)، در صورت استفاده از پنجره تک جداره و پنجره سه جداره شفاف، از نسبت ۵٪ به بعد با افزایش میزان نسبت پنجره، مصرف انرژی کل افزایش خواهد یافت. همچنین در پنجره‌های سه جداره کم گسیل و سه جداره انعکاسی، میزان مصرف انرژی کل با افزایش نسبت پنجره از ۵ تا ۱۰٪، کاهش‌یافته و پس‌ازآن افزایش می‌یابد. به‌این‌ترتیب اگر یک ساختمان از درصد پنجره بهینه در دیگر جهات بهره ببرد، برای جهت شمال نسبت ۵٪ برای پنجره‌های تک جداره و سه جداره شفاف و نسبت ۱۰٪ برای پنجره‌های سه جداره کم گسیل و سه جداره انعکاسی، نسبت بهینه و مطلوبی برای کارآمدی انرژی خواهد بود. لازم به ذکر است پنجره‌های شمالی هیچ بخشی از تابش مستقیم خورشید را در زمستان دریافت نمی‌کنند و متعاقباً بخشی از حرارت را از دست می‌دهند. در تابستان نیز این پنجره‌ها انرژی خورشیدی را جذب کرده و بنابراین مصرف انرژی ساختمان را در کل سال افزایش می‌دهند. لذا برای تمام انواع پنجره، بهتر است پنجره‌های شمالی همواره دارای نسبت‌های حداقل باشند.

در انتها و پس از مقایسه‌های صورت گرفته میان نمودارها برای هر چهار نوع پنجره در چهار جهت اصلی، مشخص گردید که در بین همه جهات، پنجره‌های جهت جنوبی بیشترین تأثیر را بر کاهش مصرف انرژی‌دارند. لذا باید تا حد ممکن در طراحی از آنها بهره گرفته شود. اگرچه مصرف انرژی با بهره‌گیری از پنجره‌های جنوبی بسیار کمتر از پنجره‌های شرقی است، اما پنجره‌های شرقی در مقایسه با پنجره‌های غربی و خصوصاً شمالی در کاهش مصرف انرژی ساختمان مؤثرترند. بنابراین استفاده از پنجره‌های جهت شرق بیشتر از غرب توصیه می‌گردد، زیرا آنها در صبحگاه حرارت خورشیدی را جذب می‌کنند درحالی‌که پنجره‌های غربی حرارت خورشیدی را در بعدازظهر جذب می‌نمایند (یعنی وقتی‌که غالباً ساختمان گرم است و نیازی هم به جذب گرما نیست). پنجره‌های شمالی نیز باید در کمترین حد ممکن در ساختمان به کار گرفته شوند. درمجموع، نسبت بهینه پنجره بر اساس نوع آن در هر جهت‌گیری در جدول ۳ نشان داده‌شده است.

میزان صرفه‌جویی در انرژی با استفاده از انواع پنجره‌ها

ازآنجاکه شاخص اصلی برای مقایسه گزینه‌های پنجره، میزان صرفه‌جویی در انرژی حاصل از آنهاست، در این بخش میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای جهت‌گیری‌های اصلی و انواع پنجره و نسبت‌های مختلف پنجره در جدول۴ نشان داده‌شده است تا به کمک نتایج حاصل از آن گزینش مساحت و نوع پنجره ایده‌آل صورت گیرد.

در جدول۴، نوع و نسبت پنجره‌هایی که بیشترین امکان صرفه‌جویی در انرژی را در یک جهت‌گیری خاص دارد، با تغییر رنگ مشخص گردیده است. در میان تمام جهت‌گیری‌ها، جهت جنوب بیشترین تأثیر را در صرفه‌جویی انرژی داراست. در میان تمام انواع پنجره و

جدول ۳. نسبت بهینه پنجره بر اساس نوع آن در هر جهت‌گیری مبتنی بر محاسبات VisualDOE

نوع پنجره	نسبت بهینه در هر جهت‌گیری (٪)			
	جنوب	شرق	غرب	شمال
تک جداره شفاف	۲۵	۱۵	۱۰	۵
سه جداره شفاف	۳۰	۲۰	۱۵	۵
سه جداره کم گسیل	۳۵	۲۰	۲۰	۱۰
سه جداره انعکاسی	۴۵	۱۵	۱۵	۱۰

جدول ۴. میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی بر اساس نوع و نسبت مساحت پنجره به دیوار مبتنی بر محاسبات VisualDOE

جهت‌گیری پنجره	نوع پنجره	نسبت مساحت پنجره به دیوار									
		٪۱۰	٪۱۵	٪۲۰	٪۲۵	٪۳۰	٪۳۵	٪۴۰	٪۴۵	٪۵۰	٪۵۵
میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی (٪)											
جنوب	تک جداره	۹/۸	۱۰	۱۰/۸	۱۱/۷	۱۲/۲	۱۱/۸	۱۱/۶	۱۱/۳	۱۰/۹	۱۰/۷
	سه جداره شفاف	۱۳	۱۴/۴	۱۵/۳	۱۶/۷	۱۸/۵	۱۹/۶	۱۸/۱	۱۷/۷	۱۶/۹	۱۶/۵
	سه جداره کم گسیل	۱۲/۶	۱۳/۹	۱۵	۱۶/۱	۱۷/۸	۱۸/۹	۲۰/۳	۱۹/۷	۱۹	۱۸/۴
	سه جداره انعکاسی	۱۱/۷	۱۲/۳	۱۳/۷	۱۴/۵	۱۵/۳	۱۶/۱	۱۶/۹	۱۷/۵	۱۸/۹	۱۷/۸
شرق	تک جداره	۹/۶	۱۰/۱	۱۱/۳	۱۰/۸	۱۰/۶	۱۰/۲	۱۰/۱	۹/۸	۹/۶	۹/۵
	سه جداره شفاف	۱۵/۱	۱۵/۸	۱۶/۱	۱۷	۱۵/۹	۱۵/۵	۱۵	۱۴/۸	۱۴/۶	۱۴/۱
	سه جداره کم گسیل	۱۴/۴	۱۷/۱	۱۸/۲	۱۸/۸	۱۶/۷	۱۵/۸	۱۵/۴	۱۵	۱۴/۹	۱۴/۷
	سه جداره انعکاسی	۱۲/۸	۱۵/۵	۱۷/۷	۱۷/۳	۱۶/۹	۱۶	۱۵/۷	۱۵/۱	۱۴/۹	۱۴/۸
غرب	تک جداره	۹/۲	۱۰/۳	۱۰	۹/۸	۹/۶	۹/۵	۹/۵	۹/۳	۹/۲	۹/۲
	سه جداره شفاف	۱۱/۷	۱۳/۱	۱۵/۸	۱۵/۴	۱۴/۹	۱۴/۲	۱۴	۱۳/۹	۱۳/۸	۱۳/۵
	سه جداره کم گسیل	۱۲/۸	۱۴/۵	۱۶/۳	۱۶/۹	۱۶/۶	۱۶/۱	۱۵	۱۴/۷	۱۴/۱	۱۴
	سه جداره انعکاسی	۱۳/۹	۱۵	۱۷/۳	۱۶/۱	۱۵/۹	۱۵/۶	۱۴/۹	۱۴/۸	۱۴/۷	۱۴/۵
شمال	تک جداره	۹	۸/۹	۸/۹	۸/۸	۸/۸	۸/۷	۸/۶	۸/۵	۸/۳	۸/۲
	سه جداره شفاف	۱۳/۹	۱۳/۷	۱۳/۵	۱۳/۲	۱۲/۸	۱۲/۳	۱۱/۸	۱۱	۱۱	۱۰/۲
	سه جداره کم گسیل	۱۴	۱۵/۷	۱۵	۱۴/۷	۱۴/۳	۱۳/۹	۱۳/۱	۱۲/۳	۱۲	۱۱
	سه جداره انعکاسی	۱۲/۸	۱۵	۱۴/۶	۱۴	۱۳/۷	۱۳/۱	۱۲/۶	۱۲/۱	۱۱/۲	۱۰/۸

نسبت‌ها نیز پنجره سه جداره کم گسیل با نسبت ۳۵٪ در جهت جنوبی حداکثر صرفه‌جویی در مصرف انرژی را به دنبال دارد که ۲۰/۳٪ (۴۲/۱ kWh/m^2a) است. همچنین حداقل صرفه‌جویی در مصرف انرژی در جهت شمال و برای پنجره تک جداره در نسبت‌های بزرگ (مثلاً ۵۵٪) رخ می‌دهد که ۷/۸٪ است. بر اساس جدول با بهینه کردن نسبت پنجره در تمام جهت‌گیری‌ها، بیشترین تأثیر میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی به ترتیب در جهات جنوب، شرق، غرب و شمال صورت خواهد گرفت.

با توجه به جدول امکان بررسی میزان صرفه‌جویی انرژی در هر جهت‌گیری به‌طور مجزا نیز وجود دارد. در جهت جنوب حداکثر

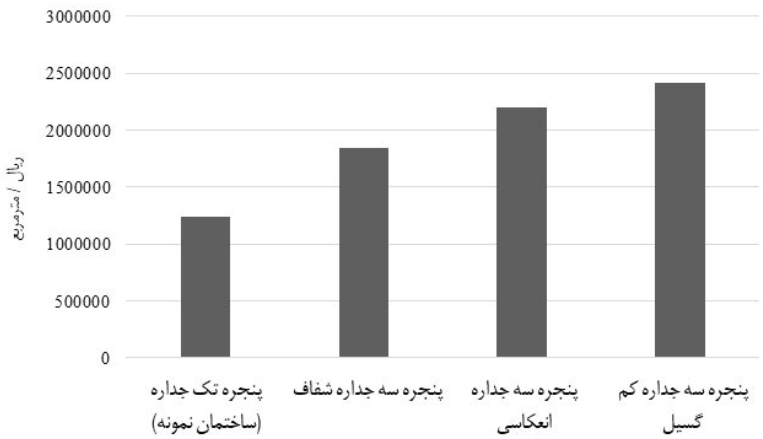
صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌تواند از دو نسبت پنجره مختلف حاصل شود یکی پنجره سه جداره کم گسیل در نسبت ۳۵٪ و دیگری پنجره سه جداره شفاف در نسبت ۳۰٪. در جهت شرق بیشترین میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی ۱۸/۸٪ است که با استفاده از پنجره سه جداره کم گسیل در نسبت ۲۰٪ حاصل می‌گردد. در جهت غرب بیشترین میزان صرفه‌جویی انرژی با استفاده از پنجره سه جداره انعکاسی در نسبت ۱۵٪ و به میزان ۱۷/۳٪ است. بهبود آسایش بصری، جلوگیری از تابش مستقیم نور خورشید و کاهش خیرگی از مزایای استفاده از پنجره انعکاسی در جهت غرب است. در جهت شمال با افزایش نسبت پنجره در تمام انواع پنجره، کاهش صرفه‌جویی در انرژی مشاهده می‌شود و بیشترین صرفه‌جویی در مصرف انرژی ۱۵/۷٪ است که توسط پنجره سه جداره کم گسیل در نسبت ۱۰٪ حاصل می‌شود.[۱۷]

تحلیل اقتصادی

به‌منظور حصول اطمینان از نتایج مربوط به شناسایی پنجره بهینه ساختمان که در گام اول این پژوهش با انجام شبیه‌سازی صورت گرفت، ارزیابی اقتصادی و تأثیر آنها بر هزینه‌های انرژی ساختمان در کنار کارآمدی انرژی بسیار ضروری است. (Alaidroos & Krarti, 2015, 15) در این گام از پژوهش به‌منظور انجام تحلیل‌های اقتصادی، از نرم‌افزار ارزیابی اقتصادی Economic Evaluation (OekoRat) که به‌طور خاص برای محاسبات اقتصادی صرفه‌جویی انرژی ساختمان و انرژی‌های تجدیدپذیر طراحی گردیده، استفاده‌شده است. این نرم‌افزار از روش «ارزش سرمایه»[۱۸] و «دوره بازگشت سرمایه» که از روش‌های استاندارد ارزیابی بهره‌وری طرح‌های اقتصادی و مناسب برای محاسبه هزینه انرژی ساختمان به شمار می‌روند، بهره می‌گیرد. به‌منظور انجام تحلیل‌های اقتصادی، ساختمان مسکونی نمونه در دو حالت دارای پوشش حرارتی بهینه (نوع و نسبت پنجره بهینه) و بدون آن و کاملاً مشابه در دیگر ویژگی‌ها، باهم مقایسه شدند و هزینه ساخت و اجرای این دو ساختمان و هزینه مصرف انرژی آنها موردسنجش قرار گرفت. در شکل ۸ تفاوت هزینه‌های اجرایی یک مترمربع از انواع پنجره باهم مقایسه شده است. بر اساس نمودار، هزینه اجرای ساختمان مسکونی دارای پنجره بهینه از نوع سه جداره شفاف، سه جداره انعکاسی و سه جداره کم گسیل، به ترتیب حدوداً ۳، ۴/۲ و ۴/۸ برابر پرهزینه‌تر از ساختمان نمونه با پنجره تک جداره است.[۱۹]

بر اساس نمودار با توجه به ثابت فرض کردن سایر اجزای پوشش حرارتی اعم از دیوار، بام و کف در هر دو بنا، تنها هزینه سیستم مکانیکی سرمایش و گرمایش ساختمان دارای پنجره بهینه، کمتر از ساختمان نمونه اولیه است، زیرا تقاضای انرژی این ساختمان کمتر است و تجهیزات کمتری هم نیاز دارد. برای محاسبه «زمان بازگشت سرمایه» و «نرخ بهره داخلی سرمایه»، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه[۲۰]، صرفه‌جویی انرژی سالانه، هزینه‌های انرژی، هزینه‌های بهره‌برداری سالانه، دوره مصرف و برخی عوامل اقتصادی دیگر نظیر نرخ بهره، نرخ تورم کلی و نرخ تورم انرژی که در کشور ایران وجود دارد، به‌صورت ورودی به نرم‌افزار داده می‌شود. (جدول ۵). ازآنجایی‌که هزینه انرژی در ایران به‌طور قابل‌توجهی پائین‌تر از دیگر کشورهاست، لازم است ارزیابی اقتصادی یک‌بار برای هزینه‌های انرژی ایران و بار دیگر برای هزینه‌های انرژی بر اساس نرخ متوسط جهانی انجام شود. دوره زمانی کاربری یعنی عمر مفید ساختمان مسکونی در ایران نیز در محاسبات ۳۰ سال در نظر گرفته‌شده است.[۲۱]

شرط اولیه بهره‌وری این است که زمان بازگشت سرمایه باید کمتر از زمان طول عمر آن سیستم (در اینجا دوره مصرف ساختمان) باشد. اگر این شرط اعمال شود، «نرخ بهره داخلی سرمایه» دومین شرط برای ارزیابی بهره‌وری اقتصادی یک سرمایه‌گذاری است. به این منظور



شکل ۸. مقایسه هزینه‌های اجرایی یک مترمربع از انواع پنجره ساختمان مسکونی در دو حالت دارای پوشش حرارتی بهینه (نوع و نسبت پنجره بهینه) و بدون آن (Source: Tehranwin, 2015)

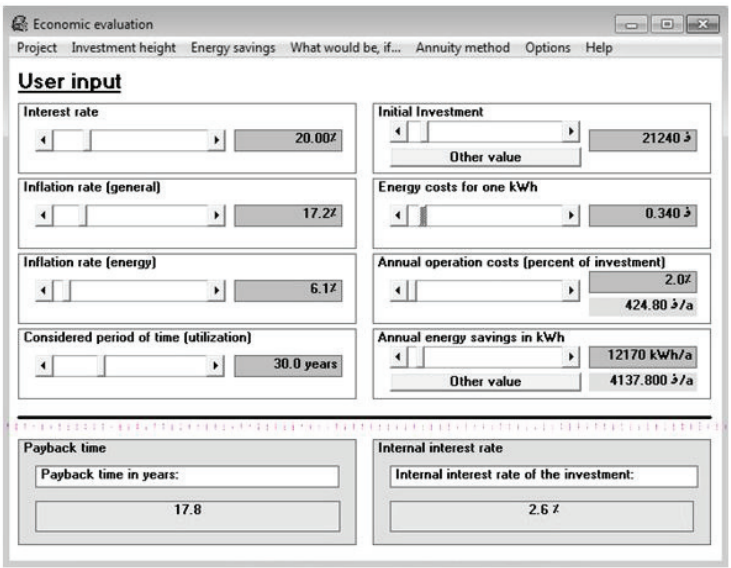
جدول ۵. نرخ مؤلفه‌های اقتصادی مؤثر بر ارزیابی اقتصادی در ایران و جهان در سال ۲۰۱۵

عوامل اقتصادی	ایران	متوسط جهانی
هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (ریال)	۷۵۴/۱۲۹/۲۰۰ (Tehranwin, 2015)	۲۷۳/۱۶۸/۲۴۰ (Diypvcwindows, 2015)
صرفه‌جویی انرژی سالانه[۲۲] (کیلووات ساعت)	۱۲۱۷۲/۳۲	۱۲۱۷۲/۳۲
هزینه‌های انرژی گاز طبیعی (ریال به مترمکعب)	۱۲۳۰ (شرکت ملی گاز ایران، ۱۳۹۳)	۹۷۴۰۰ (معادل ۲/۹ دلار به مترمکعب) (Iea, 2015a)
هزینه‌های انرژی برق (ریال به کیلووات ساعت)	۵۷۸ (شرکت برق منطقه‌ای تهران، ۱۳۹۳)	۶۶۰۰ (معادل ۰/۲ دلار به کیلووات ساعت) (lea, 2015b)
هزینه‌های بهره‌برداری سالانه[۲۳] (٪)	۲	۲
دوره زمانی کاربری (دوره مصرف)[۲۴] (سال)	۳۰	۳۰
نرخ بهره[۲۵] (٪) (worldbank, 2015b)	۲۰	۱۷
نرخ تورم کلی[۲۶] (٪) (worldbank, 2015a)	۱۷/۲	۲/۶
نرخ تورم انرژی گاز طبیعی و برق (٪) (worldbank, 2015a)	۶/۱	۰/۵

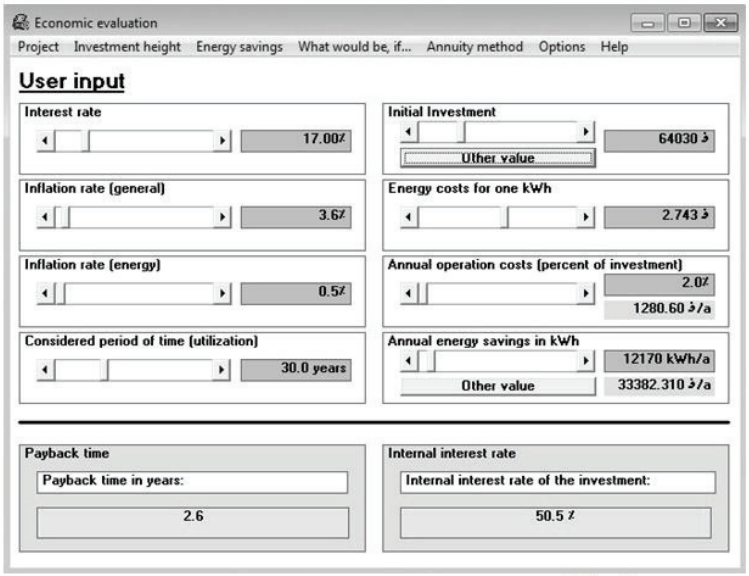
درآمدهای تنزیل شـــده در طول دوره بازگشت سرمایه با هزینه‌های تنزیل شده در همین دوره برابر قرار داده می‌شوند و بر این اساس نرخ بازگشت، تعیین می‌شود. اگر این نرخ بازگشت از نرخ بهره واقعی بیشتر باشد، طرح ســـودآور و قابل‌اجرا بوده و اگر نرخ بازگشت محاسبه‌شده کمتـــر از نرخ بهره واقعی باشـــد، طرح زیان‌ده و غیرقابل اجرا اســـت. (Knittel et al., 2014)

ارزیابی اقتصادی بر اساس هزینه‌های انرژی در ایران

ارزیابـــی اقتصادی به کمک هزینه‌های انرژی ایران نشـــان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در ساختمانی دارای نوع و نسبت بهینه پنجره در ایران ازنظر اقتصادی چندان به‌صرفه نیســـت، زیرا زمان بازگشـــت سرمایه در ایـــن ســـرمایه‌گذاری در حالت عادی، بیـــش از نصف دوره مصرف ســـاختمان (۳۰ سال) است (شکل ۹). بر اساس محاسبات، ۱۷/۸ سال زمان لازم اســـت تا هزینه پرداختی جهت اســـتفاده از پنجره بهینه، با میزان پس‌انداز ناشـــی از صرفه‌جویی انرژی متأثر از آن، جبران گردد. علت این امر هزینه پائین انرژی در ایران در مقایســـه با قیمت جهانی است. همچنین نرخ بهره‌وری داخلی این سرمایه‌گذاری ۲/۶٪ است که کمتر از نرخ بهره‌وری کلی (۲۰٪) است.



شکل ۹. تحلیل اقتصادی با نرم‌افزار OekoRat در راستای استفاده از نوع و نسبت بهینه پنجره در ساختمان با استفاده از نرخ هزینه‌های انرژی در ایران



شکل ۱۰. تحلیل اقتصادی با نرم‌افزار OekoRat در راستای استفاده از نوع و نسبت بهینه پنجره در ساختمان با استفاده از متوسط هزینه‌های انرژی جهانی

ارزیابی اقتصادی بر اساس متوسط هزینه‌های انرژی جهانی

به دلیل هزینه‌های پایین انرژی در ایران، ارزیابی اقتصادی با استفاده از متوسط هزینه‌های انرژی جهانی، معتبر و قابل استناد خواهد بود. (شکل ۱۰). بر اساس محاسبات، در این حالت زمان بازگشت سرمایه ۲/۶ سال است. این مدت‌زمانی است که طی آن هزینه پرداختی جهت استفاده از پنجره بهینه، با میزان پس‌انداز ناشی از صرفه‌جویی انرژی متأثر از آن، جبران می‌گردد که در حدود ۰/۰۹ دوره مصرف ساختمان (۳۰ سال) است. این محاسبه نشان می‌دهد که تحت این شرایط سرمایه‌گذاری برای ساخت ساختمانی دارای نوع و نسبت بهینه پنجره، بر اساس نرخ متوسط هزینه‌های انرژی جهانی به‌صرفه خواهد بود. نرخ بهره‌وری داخلی این سرمایه‌گذاری هم ۵۰/۵٪ است که در مقایسه با نرخ بهره‌وری کلی (۱۷٪)، بسیار مناسب است.

نتایج ارزیابی اقتصادی

قیمت پایین حامل‌های انرژی در ایران در مقایسه با کشورهای دیگر و نرخ جهانی آن و درعین‌حال هزینه بالای مصالح ساختمانی، تفاوت زیادی را در هزینه‌های ساخت‌وساز (حدود ۴/۸ برابر) مابین ساختمان مسکونی انرژی کارآمد و ساختمان نمونه نشان می‌دهد. بااین‌حال اگر ساختمان‌های مسکونی از نوع و نسبت بهینه پنجره بهره ببرند (یعنی مبتنی بر عوامل پیشنهادی برای کاهش مصرف انرژی ساختمان در اقلیم گرم و خشک شهر تهران باشند) و بر اساس هزینه‌های انرژی بین‌المللی تحلیل شوند، طراحی این ساختمان‌ها ازنظر اقتصادی هم به‌صرفه خواهد بود. سرمایه‌گذاری در چنین ساختمان‌هایی زمان بازگشت سرمایه بسیار کوتاهی دارند (۲/۶ سال) و نرخ بهره داخلی آنها زیاد است (۵۰/۵٪).

بنابراین اگرچه سرمایه‌گذاری در این بخش مزایایی مهم و حیاتی را در سطح ملی به دنبال خواهد داشت، اما به خاطر اعطای یارانه انرژی در ایران تقاضای مردمی زیادی برای چنین پروژه‌هایی وجود ندارد، مگر اینکه حمایت‌های دولتی در این حوزه صورت گیرد. به‌طورکلی صرفه‌جویی در میزان مصرف انرژی کل کشور و به‌طور خاص در بخش ساختمان، مادامی‌که صرفه اقتصادی نداشته باشد، به‌طور مؤثر در ایران رخ نخواهد داد. تحقق این امر منوط به دخالت نهادهای دولتی خواهد بود که می‌تواند از طریق کاهش یا حذف کامل یارانه سوخت‌های فسیلی انجام شود و یا از طریق اعطای یارانه به اقدامات صرفه‌جویانه انرژی مانند به‌کارگیری مصالح عایق، پنجره‌های چند جدارهو موارد دیگر صورت پذیرد. در این صورت صرفه‌جویی در میزان مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی به‌طور فزاینده‌ای ازنظر اقتصادی پربازده خواهد بود و علاقه جمعی به صرفه‌جویی در انرژی و پروژه‌های انرژی کارآمد را افزایش خواهد داد.

نتیجه‌گیری

امروزه مطالعات زیادی برای یافتن روش‌های ذخیره انرژی در ساختمان صورت گرفته است. ازآنجاکه حدود یک‌سوم انرژی ساختمان‌ها از طریق پنجره‌ها هدر می‌رود، به همین دلیل تلاش برای کاهش مصرف

انرژی در ساختمان‌ها بر روی پنجره‌ها، به‌عنوان ضعیف‌ترین بخش پوشش حرارتی، متمرکزشده است. هدف از این تحقیق، گزینش نوع و نسبت بهینه پنجره در ساختمان و مطالعه تأثیر آن بر هزینه‌های انرژی و همین‌طور ارزیابی دوره بازگشت سرمایه و نرخ بهره‌وری داخلی متأثر از آن بود که این امر از طریق شبیه‌سازی به کمک دو نرم‌افزار VisualDOE و OekoRat میسر گردید. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که نسبت بهینه برای یک پنجره در هر جهت‌گیری با توجه به عواملی چون مساحت پنجره در دیگر جهت‌گیری‌ها، نوع پنجره و میزان انتقال انرژی خورشیدی آنها متفاوت خواهد بود. بنابراین دستورالعمل یکسانی که بتواند نسبت پنجره بهینه برای هر دیوار را در کلیه ساختمان‌ها تعیین نماید، امکان‌پذیر نیست و صرفه‌جویی در میزان مصرف انرژی مشابهی می‌تواند از چند نوع پنجره مختلف در نسبت‌های متفاوت حاصل گردد که این امر نیاز به بررسی توأمان نوع و نسبت پنجره در مراحل اولیه طراحی ساختمان را آشکار می‌نماید. درمجموع یافته‌های تحقیق در گام اول را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

همان‌گونه که انتظار می‌رفت استفاده از انواع پنجره سه جداره در مقایسه با پنجره تک جداره، بین ۲۵٪ تا ۴۰٪، میزان مصرف انرژی را کاهش خواهد داد.

تأثیر نسبت پنجره بر میزان صرفه‌جویی در انرژی ساختمان در نسبت‌های کمتر از ۵۵٪ محسوس‌تر است و در نسبت‌های بیشتر در تمام انواع پنجره و جهات کاهش در میزان صرفه‌جویی انرژی دیده می‌شود.

شیشه‌های با کارایی بالای حرارتی و انتقال مرئی کم (شیشه سه جداره انعکاسی) امکان استفاده از نسبت‌های بزرگ‌تری را برای پنجره ایجاد می‌کنند و در نسبت‌های پایین، پنجره‌های با انتقال مرئی زیاد (شیشه تک جداره شفاف) عملکرد بهتری دارند.

بامطالعه درصد یکسان نسبت پنجره به دیوار در چهار جهت اصلی، مشخص گردید که پنجره‌های تک جداره، سه جداره شفاف، سه جداره کم گسیل و سه جداره انعکاسی به ترتیب در نسبت‌های ۱۵٪، ۲۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪ بیشترین میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی را دارا هستند.

بامطالعه نسبت مختلف پنجره در هر یک از جهات و بهره‌مند از نسبت بهینه در سه جهت دیگر مشخص گردید که بسته به نوع پنجره، نسبت‌های متفاوتی بیشترین صرفه‌جویی را حاصل خواهند کرد (جدول ۳) و در این مورد جهات، جنوب، شرق، غرب و شمال به ترتیب بیشترین تأثیر را بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی دارند.

به‌طورکلی به کمک بهینه‌سازی نوع و نسبت پنجره در حدود ۲۰/۳٪ صرفه‌جویی در ساختمان مسکونی نمونه در هر تهران به دست آمد که اهمیت توجه به این مقوله را در فاز اولیه طراحی نشان می‌دهد.

مطابق نتایج تحلیل‌های اقتصادی، زمان لازم برای بازگشت سرمایه‌گذاری اولیه، با توجه به قیمت حامل‌های انرژی در ایران و متوسط جهانی، به ترتیب ۱۷/۸ و ۲/۶ سال است که تفاوت بسیار زیادی را بین این دو نشان می‌دهد. به‌این‌ترتیب سیاست‌های صرفاً تشویقی دولت درزمینهٔ ترغیب مصرف‌کننده داخلی به‌صرف چنین هزینه بالایی کارساز نخواهد بود. یکی از راهکارها برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی با بهره‌گیری از پنجره‌های بهینه، اعمال سیاست‌های قیمتی بر روی حامل‌های انرژی است، بدین معنی که قیمت سوخت در کشور مطابق با قیمت‌های جهانی متعادل گردد اما به دلایل شرایط اقتصادی و اجتماعی ایران، این افزایش قیمت حتی تا سطح قیمت منطقه نیز باعث اقتصادی بودن بسیاری از طرح‌های صرفه‌جویی انرژی نمی‌گردد و با استقبال عمومی روبرو نخواهد شد.

آنچه معقول و نتیجه‌بخش به نظر می‌رسد، اعمال سیاست‌های یارانه بر مصالح و اجزای ساختمانی است، به‌نحوی‌که دولت با تقبل بخشی از هزینه‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان، مصرف‌کننده را تشویق نماید. همچنین حمایت‌های مالی، امکانات و تسهیلات کمکی، مشاوره و ارائه اطلاعات فنی رایگان و حمایت‌های مشابه برای طراحی و ساخت ساختمان‌های کم انرژی، باعث جلب علاقه عمومی برای ساخت ساختمان‌های انرژی‌کارا می‌گردد. بودجه تأمین این‌گونه حمایت‌های مالی و نیز حمایت‌های فنی می‌تواند از منبع حذف یارانه‌های انرژی تأمین گردد.

پی‌نوشت‌ها

۱. در سال ۱۳۹۳ پروان‌های احداث ساختمان مسکونی صادرشده از سوی شهرداری‌های شهر تهران بالغبر ۲۶۷۷۵ واحد بوده است که از این تعداد حدود ۰/۷ درصد مربوط به افزایش بنا و ۹۹/۳ درصد مربوط به احداث ساختمان بوده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۴).

۲. نسبت پنجره به دیوار (Window to wall ratio (WWR درصدی از حاصل تقسیم مساحت پنجره به مساحت دیوارهای خارجی است که متغیری تأثیرگذار در انرژی کارآمدی ساختمان به شمار می‌آید. این نسبت بر مصرف انرژی گرمایش، سرمایش و روشنایی به‌اندازه نور طبیعی، تهویه و دید اثر دارد (Commercialwindows, 2015).

۳. Payback Period: دوره بازگشت سرمایه، مقطع زمانی (به سال) است که در آن سود خالص تجمعی یا مجموع جریان‌های نقدی ورودی طرح در طی سال‌های مختلف، معادل رقم مربوط به سرمایه‌گذاری انجام‌شده در طی دوران احداث (بهره‌برداری) باشد (Kaldellis et al., 2010).

۴. در سال ۱۳۹۳ میانگین مساحت زمین در شهر تهران ۳۱۴ مترمربع و متوسط مساحت زیربنای هر واحد مسکونی ۹۴/۲ مترمربع بوده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۴).

۵. (UValue): هرچه میزان این ضریب کمتر باشد، پنجره مقاومت بیشتری را در برابر انتقال گرما دارا است.

6. Air Change per Hour

۷. در راستای اعتبارسنجی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی، در سال ۲۰۰۵ طی گزارشی که با همکاری دانشگاه ویسکانسین در آمریکا و دپارتمان انرژی آمریکا انجام گرفت، قابلیت‌های عمومی بیست نرم‌افزار مطرح شبیه‌سازی آورده شده و برترین نرم‌افزارها معرفی شدند که نرم‌افزار VisualDOE یکی از آنهاست (Drury et al., 2008). شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این نرم‌افزار با دقتی قابل‌قبول مصرف انرژی را محاسبه می‌نماید.

۸. انرژی کل شامل مجموع انرژی‌های گرمایش، سرمایش و روشنایی است.

۹. Internal Rate of Return: نرخ بهره داخلی سرمایه، نرخ بازدهی مورداستفاده در بودجه‌بندی سرمایه برای اندازه‌گیری و مقایسه سودآوری سرمایه‌گذاری است. در این روش تلاش می‌شود تا جریان نقدینگی با نرخ بازگشت نامعلومی به نرخ کنونی تنزیل داده شوند. به‌گونه‌ای که ارزش خالص فعلی آن برابر صفر گردد (بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۴).

۱۰. ملاک گزینش پنجره‌ها دارا بودن نشان سازمان ملی استاندارد ایران و همین‌طور استانداردهای تعیین ویژگی‌های نوری پنجره (EN 410)، آزمایش جذب، انعکاس و انتقال خورشیدی شیشه (ASTME 903) و استاندارد شیشه و قاب پنجره کمیته اروپایی استاندارد (CEN) و نیز پرمصرف بودن آنها در حوزه ساختمان و مسکن بوده است.

۱۱. دانسته است که ساختار مقالات علمی ـ پژوهشی با رویکرد بهینه‌سازی مصرف انرژی، بر مطالعه و بررسی، بسترسازی و کمک به توسعه کاربرد فناوری‌های نوین انرژی و آموزش و اطلاع‌رسانی، استوار است. تاکنون غالب پژوهش‌های داخلی مشابه بر پنجره‌های دوجداره متمرکز بوده و با توجه به گسترش روزافزون استفاده از پنجره‌های سه جداره و همچنین جنبه نوآورانه بودن مقاله، پنجره‌های سه جداره در این پژوهش موردمطالعه قرار گرفته‌اند. کارایی پنجره‌های سه جداره بیش از دوجداره بوده (افزودن هر جداره به پنجره در حدود ۱۲٪ بازدهی را افزایش می‌دهد) و در درازمدت صرفه‌جویی بیشتری در مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های ناشی از تقاضای انرژی به همراه خواهند داشت. درعین‌حال میزان نورگذر بودن پنجره با افزایش تعداد جداره‌های آن کاهش قابل‌توجهی ندارد (میرهاشمی و همکاری، ۱۳۸۹، ۴۴).

۱۲. پر شدن لایه میانی جداره‌ها توسط گازهای بی‌اثر (همچون آرگون) با وزن مولکولی بالاتر نسبت به هوا، انتقال حرارت را در پنجره کمی بیشتر کاهش می‌دهد (دانش، ۱۳۸۲، ۹۶).

13. Visible Transmittance

14. Shading Coefficient

15. Solar Heat Gain Coefficient

۱۶. برای ورود حداقل میزان نور طبیعی و امکان دید بصری خارجی، کمترین نسبت پنجره در شبیه‌سازی‌ها ۵٪ فرض شده است. همچنین ازآنجاکه در نسبت‌های پنجره بیشتر از ۵۵٪ روند مشابهی در شبیه‌سازی‌ها مشاهده شد، نسبت‌های بالاتر در نمودارها نمایش داده نشده است.

۱۷. در راستای اعتبارسنجی نتایج حاصل از این پژوهش، خروجی‌های نرم‌افزار Design Builder که در رساله دکتری نگارنده اول برای شبیه‌سازی میزان مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی با انواع و نسبت‌های مختلف پنجره در شهر تهران به‌کار گرفته‌شده بود، با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار VisualDOE تطبیق داده شد و سازگاری قابل‌قبولی مشاهده گردید.

۱۸. Capital Value: ارزش سرمایه، قیمت احتمالی است که در تاریخ ارزش‌گذاری برای یک دارایی پرداخت‌شده است (Pless & Torcellini, 2012, 3).

۱۹. در محاسبات هزینه اجرا، مساحت پنجره‌ها در حالت بهینه که در مرحله نخست پژوهش به دست آمد، لحاظ شده است.

۲۰. هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، مابه‌التفاوت هزینه کل ساختمان نمونه و ساختمان دارای پنجره بهینه است (طبیبیان، ۱۳۷۹).

۲۱. عمر مفید ساختمان در ایران یک‌پنجم میانگین جهان و حدود ۲۵ تا ۳۰ سال است (ولدان، ۱۳۹۳).

۲۲. صرفه‌جویی انرژی سالانه (کیلووات ساعت) = (عدد انرژی اولیه – عدد انرژی بهینه) x زیربنای کل ساختمان.

23. Annual operating costs

۲۴. دوره زمانی کاربری (دوره مصرف) که به‌عنوان داده به نرم‌افزار ارزیابی اقتصادی داده می‌شود، صرفاً عمر مفید ساختمان نیست بلکه مدت‌زمانی است که بهره‌وری اقتصادی یک سرمایه‌گذاری در طول آن مدت‌زمانی، سنجیده می‌شود. ازآنجاکه دوره بازگشت سرمایه در کشورهای مختلف بستگی به شاخص‌های اقتصادی متعددی نظیر میزان تورم، قیمت حامل‌های انرژی، هزینه‌ای بهره‌برداری و ... دارد، لذا در ارزیابی اقتصادی این پژوهش، به دلیل قیمت کم حامل‌های انرژی در ایران، ارزیابی اقتصادی با استفاده از هزینه‌های انرژی بر اساس نرخ جهانی و بین‌المللی آن مستند و قابل اعتبار خواهد بود. درعین‌حال برای آن‌که تأثیر پایین بودن قیمت حامل‌های انرژی در ایران به‌طور عملی یافت گردد، بایستی داده‌های دیگر ثابت فرض شود تا مقایسه در شرایط یکسان صورت گیرد و در تمامی آمارها و شاخص‌های

جهانی نیز به این صورت عمل می‌گردد.

25. Interest rate

26. General Inflation rate

فهرست مراجع

۱. ابراهیم‌پور، عبدالسلام؛ و محمدکاری، بهروز. (۱۳۹۰). روشی جدیدی برای طراحی پنجره با توجه به مصرف انرژی. *مهندسی مکانیک مدرس*، ۱۱(۱)، ۷۷۸۸.

۲. بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران. (۱۳۸۹). بهره‌وری و شدت انرژی در ایران و جهان. تهران: اداره بررسی‌ها و سیاست‌های اقتصادی. بازیابی ۱۹ دی، ۱۳۹۴، از http://www.cbi.ir/page/7249.aspx

۳. حبیب، فرح؛ برزگر، زهرا؛ و چشمه قصابانی، مریم. (۱۳۹۳). رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر مصرف انرژی ساختمان با کاربرد فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی. *نقش جهان*. ۴(۲)، ۴۷۵۳.

۴. خان‌محمدی، شعیب؛ خان‌محمدی، صابر؛ امیرعلی پور، مجید؛ و همایون، احمد. (۱۳۹۲). پتانسیل‌سنجی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری، *اولین همایش تخصصی محیط زیست، انرژی و صنعت پاک*. آذر ۱۱۱۲، (ص ۱۱ ۱). تهران: دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران. بازیابی ۱۴ خرداد، ۱۳۹۴، از http://www.civilica.com/PaperEECICO01EECICO01_380.html

۵. دانش، ماندانا. (۱۳۸۲). پنجره‌های حرارتی برای استفاده بهینه از انرژی خورشیدی. *سومین همایش بین‌المللی بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان*. بهمن ۲۷۲۶، (ص ۹۳۱۰۳). تهران: سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور. بازیابی ۱۶ اردیبهشت، ۱۳۹۴، از http://www.civilica.com/PaperCECB03CECB03_009.html

۶. دقیق، روناک؛ و مشتاق، جلیل. (۱۳۸۲). انتخاب بهینه سیستم‌های شیشه و پنجره به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی، *سومین همایش بهینه‌سازی سوخت در ساختمان*. بهمن ۲۶۲۷، (ص ۹۵۵۹۶۳). تهران: سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور. بازیابی ۱۱ اسفند، ۱۳۹۳، از http://ifco.ir/building/amozesh/lecture/doc/building/0053.pdf

۷. شرکت برق منطقه‌ای تهران. (۱۳۹۳). *نرخ برق مشترکین خانگی و تجاری*. بازیابی ۳ بهمن، ۱۳۹۳، از http://trec.co.ir/Default.aspx?tabid=4754

۸. شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت. (۱۳۹۴). *ساختمان و لوازم خانگی*. صرفه‌جویی انرژی در پنجره‌ها. بازیابی ۱۹ اردیبهشت، ۱۳۹۴، از http://ifco.ir/building/build/window_extra5.asp

۱۰. شرکت ملی گاز ایران. (۱۳۹۳). *جدول تعرفه گازبهای خانگی*. بازیابی ۵ بهمن، ۱۳۹۳، از http://www.nigc.ir/Portal/Home/ShowPage.aspx?Object=NEWS&CategoryID=1601f6c2-3b71-410c-ad90-8b94b25601

۱۱. شیرازیان، محمدحسین؛ حسینی، سید باقر؛ و نوروزیان ملکی، سعید. (۱۳۹۳). مطالعهٔ تطبیقی جداره‌های خارجی (نما) در ساختمان‌های مسکونی تهران با روش تحلیل سلسله مراتبی. *هویت شهر*. ۸(۱۸)، ۷۰-۶۱.

۱۲. طبیبیان، محمد. (۱۳۷۹). *اقتصاد کلان*. تهران: موسسه عالی پژوهش در برنامه‌ریزی و توسعه.

۱۳. غیائی، محمدمهدی؛ مهدوی‌نیا، مجتبی؛ طاهباز، منصوره؛ و مفیدی شمیرانی، مجید. (۱۳۹۲). روش‌شناسی گزینش نرم‌افزارهای کاربردی شبیه‌ساز انرژی در حوزه معماری. *هویت شهر*، ۷(۱۳)، ۵۵-۴۵.

۱۴. مرکز آمار ایران. (۱۳۹۴). *اطلاعات پروانه‌های ساختمانی صادر شده توسط شهرداری‌های کشور*. بازیابی ۱۶ فروردین، ۱۳۹۴، از http://www.amar.org.ir/Portals/0/Files/fulltext/1393/n_epsstshk_93-2.pdf

۱۵. میرهاشمی، سیدمهدی؛ شاپوریان، سید محمدهادی؛ و قیابکلو، زهرا. (۱۳۸۹). روشی نوین در بهینه‌سازی پنجره‌های تک‌جداره. *هنرهای زیبا ـ معماری و شهرسازی*. ۴۳، ۴۸-۴۳.

۱۶. نصراللهی، فرشاد. (۱۳۹۰). ضوابط معماری و شهرسازی کاهش دهنده مصرف انرژی ساختمان‌ها، *همایش معماری ساختمان، اقلیم و بهینه‌سازی مصرف انرژی*. اسفند ۱۷، (ص ۴۵-۱). تهران: کمیته ملی انرژی ایران، بازیابی ۱۷ دی، ۱۳۹۳، از http://www.saba.org.ir/saba_content/media/image/2012/03/3512_orig.pdf

۱۷. ولدان، مجید. (۱۳۹۳). *عمر مفید ساختمان در ایران*. بازیابی ۱۹ خرداد، ۱۳۹۴، از http://www.irceo.net/fullstory.aspx?id=5193

18. Alaidroos, A., & Krarti, M. (2015). Optimal design of residential building envelope systems in the Kingdom of Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, 86, 104-117. Retrieved March 27, 2015, from http://www.researchgate.net/publication/267456152.

19. Aldossary, N. A., Rezgui, Y., & Kwan, A. (2014). Domestic energy consumption patterns in a hot and humid climate: a multiple-case study analysis. *Applied Energy,* 114, 353-365. Retrieved April 8, 2015, from http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913008088

20. Commercialwindows. (2015). Retrieved June 18, 2015, from http://www.commercialwindows.org/wwr.php

21. Diypvcwindows. (2015). Retrieved May 12, 2015, from www.diypvcwindows.co.uk

22. Dury, B., Jon, W., Kummert, M., & Brent, T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance

simulation programs. *Building and Environment*, 43, 661-673.

23. Ghiai, M., Mahdavinia, M., Parvane, F., & Jafarikhah, S. (2014). Relation between Energy Consumption and Window to Wall Ratio in High-Rise Office Buildings in Tehran. *Natural and Social Sciences.* 3(2), 366-375. Retrieved January 10, 2015, from http://european-science.com/eojnss/article/view/1423/pdf.

24. Hamelin, M.C., & Zmeureanu, R. (2014). Optimum Envelope of a Single-Family House Based on Life Cycle Analysis. *Buildings,* 4, 95-112. Retrieved June 3, 2015, from https://www.mdpi.com/2075-5309/4/2/95/pdf.

25. Iea. (2015a). *Natural gas.* Retrieved May 14, 2015, from http://www.iea.org/topics/naturalgas

26. Iea. (2015b). *Electricity*. Retrieved May 14, 2015, from http://www.iea.org/topics/electricity

27. Kaldellis, J.K., Zafirakis, D., & Kondili, E. (2010). Energy pay-back period analysis of stand-alone photovoltaic systems. *Renewable Energy,* 35 (7), 1444-1454. Retrieved June 9, 2015, from http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109005655

28. Knittel, C.R., Greenstone M., & de la Peña C.T. (2014). Understanding the Economics of Energy Efficiency. *Seizing the Energy Efficiency Opportunity in the Commercial Built Environment*. May 12, (pp.1-22). Massachusetts: MIT Energy Initiative.

29. Nasrollahi, F., Wehage, P., Shahriari, E., & Tarkashvand, A. (2013). *Energy Efficient Housing for Iran Pilot Buildings in Hashtgerd New Town.* Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin.

30. Pilkington. (2015). Retrieved May 21, 2015, from http://www.pilkington.com/resources/glasshandbook2010english.pdf

31. Pless, Sh., & Torcellini, P. (2012). Controlling Capital Costs in High Performance Office Buildings: A Review of Best Practices for Overcoming Cost Barriers. *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.* August 12-17, (pp.1-19). California: national laboratory of the U.S. Department of Energy.

32. Tehranwin. (2015). Retrieved January 21, 2015, from http://www.tehranwin.com/

33. Worldbank. (2015a). *Inflation, consumer prices* (annual %). Retrieved May 14, 2015, from http://data.worldbank.org/indicator/FP.CPI.TOTL.ZG

34. worldbank .(2015b). *Real interest rate* (%). Retrieved May 14, 2015, from http://data.worldbank.org/indicator/FR.INR.RINR

35. Yang, Q., Liu, M., Shu, C., Mmereki, D., Hossain, U., & Zhan, X. (2015). Impact Analysis of Window-Wall Ratio on Heating and Cooling Energy Consumption of Residential Buildings in Hot Summer and Cold Winter Zone in China. *Journal of Engineering,* 18(1), 1-17. Retrieved May 11, 2015, from http://www.hindawi.com/journals/je/2015/538254/

36. Yildiz, Y., Ozbalta, T.G., & Arsan, Z. D. (2011). Impact of Window-to-Wall Surface Area for Different Window Glass Types and Wall Orientations on Building Energy Performance: A Case Study for a School Building Located in Izmir Turkey. *Megaron,* 6(1), 30-38. Retrieved January 22, 2015, from http://www.megaronjournal.com/download.asp?ID=39.

ISSN 17359562 © 2019 IAU

Economic Analysis and Assessing Energy Performance of Simulation-Powered Optimal Window Type and Window to Wall Ratio for Residential Buildings in Tehran

Alireza Karimpour,* Ph.D. Candidate in architecture, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran.
Darab Diba, Professor, Faculty of Arts and Architecture, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran.
Iraj Etessam, Professor, Faculty of Arts and Architecture, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

Abstract

Today, with the rapid depletion of fossil energy sources and increasing of environmental problems, supervision and management of energy consumption becomes more important. Looking at the breakdown of energy consumption by sectors, the buildings sector is seen as one of the priority areas. About 40% of energy consumption of the residential buildings in Iran is fossil fuel-derived. In recent years, housing units increased significantly in Tehran as the largest and most populous city of Iran and targeted subsidies policy is implemented and energy costs have gone up. Therefore providing solutions to reduce energy consumption in this sector is very important.

Windows are one of the most important components of building thermal coating that affect the energy efficiency and environmental thermal comfort. It is obvious windows play a critical role in saving energy because about 30% of the total energy loss occurs through them.

Therefore the evaluation of the optimal window type and window to wall ratio in the first phase of architectural design, plays an important role in the energy efficiency and improving the quality of indoor environment. The main objective of this paper is to present an approach that provides assistance for designers to select optimal ratio of window to wall for residential buildings concerning economic analysis that affect this assessment.

In this research, a building model as a case study (the six-story apartment in the city of Tehran) is considered and then its energy consumption optimized via simulation software. Based on the simulations, two optimization parameters, window to wall ratio and type of windows, are evaluated.

In this regard, at the first phase, four types of window glazing with same size in four main orientations and a window to wall ratio of 5 to 55% on residential building was simulated to determine the optimized window to wall ratio through evaluating of energy consumption. At the next step, optimized windows in three directions was considered on building model for simulations of energy consumption and then optimized windows in terms of energy efficiency was identified. Finally, for economic analysis of the use of optimal windows, a newly designed building that uses the optimal window is economically compared to a house that is architecturally and structurally similar to existing buildings and has more energy consumption. The energy costs, payback period and internal rate of return of these two buildings are compared to find the economical differences.

The results show that energy consumption of residential buildings in Tehran reduced up to 20/3% only by using high performance windows and optimum wall to window ratio. It can be concluded that the influence and sensitivity of window-wall ratio on the total energy consumption are related to the orientation of outside window, and the glazing types of window. The window orientations could be prioritized in the following order: south, east, west, and north. Also according to the current price of fuel in Iran and the 17/8 years payback period that Obtained from economic analysis, the additional initial cost will be offset by the proposed policies.

Keywords: Energy Consumption Simulation, Type of window, Window to wall ratio, Energy Costs, Payback Period.

* Corresponding Author: Email: alireza.karimpour@yahoo.com