



Determining the Most Efficient Window-to-Wall Ratio in Southern Façade of Educational Buildings in Kerman

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Fallah H.* PhD

How to cite this article

Fallah H. Determining the Most Efficient Window-to-Wall Ratio in Southern Façade of Educational Buildings in Kerman. Naqshejahan- Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2019;9(2):105-115.

ABSTRACT

Energy consumption of the buildings is highly dependent to the specifications of its envelope. Windows have a significant effect on the thermal specification of the building envelope, because of their high thermal conductivity and direct solar transmittance. Hence, specifying the best window-to-wall ratio (WWR) is very important in all climates. This study aims to specify the effective variables on optimizing window-to-wall ratio for the southern façade in Kerman, based on thermal specifications of the building envelope. The research method is a combination of field surveys and software simulations. In the field survey method, window to south façade ratio of 26 single-spaces in 16 traditional residential and educational buildings in Kerman were measured, drawn, and analyzed. The results showed that the window-to-wall ratio of 5% to 15% had the most frequency in the surveyed samples. In software simulation method, window and wall heat transfer coefficients were analyzed rather than SHGC (solar heat gain coefficient), and their effects on annual load were determined. Finally, the 30% ratio was specified as the most efficient window-to-wall ratio for southern façade in Kerman. According to the results, it can be concluded that if the only thermal analysis is considered, the optimum window-to-wall ratio in the southern façade in Kerman is 15% while using the single glazed window; and it is 30% while using the double glazed window if the SHGC is not less than 0.4. The results also revealed a high dependency on the buildings' annual thermal load to windows' SHGC. So, finally, modifications were proposed in the 9th appendix of Code 19, in order to include the SHGC factor.

Keywords Window-to-Wall Ratio; Solar Heat Gain Coefficient; Southern Façade; Energy Optimization; Traditional Architecture; Kerman City

CITATION LINKS

[1] Iranian building national code 19: Energy ... [2] A study on the proposes of energy analysis indicator by the window elements of ... [3] Impacts of building envelope design factors upon energy loads and their optimization ... [4] Energy consumption in buildings: a correlation for the influence of window to wall ... [5] Impact of glazing to wall ratio in various climatic regions: a ... [6] Architectural design optimization of school buildings for reduction of energy ... [7] Assessment of window performance in classrooms by long term spatial comfort ... [8] The effects of orientation, ventilation, and varied WWR on the thermal performance ... [9] Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of ... [10] Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance ... [11] Optimizing the configuration of a façade module for office buildings by means ... [12] Horizontal Distribution of Illuminance with Reference to Window Wall Ratio ... [13] Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different ... [14] Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and ... [15] Evaluation of building energy saving through the development of venetian blinds' optimal control algorithm ... [16] Maximum window-to-wall ratio of a thermally autonomous building as a function of ... [17] An assessment of energy-saving solutions for the envelope design of high-rise ... [18] An approach to design and calculation of new Spectral Solar Shader ... [19] Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on ... [20] Using simulation tools for optimizing cooling loads and daylighting levels in ... [21] Passive cooling of the green roofs combined with night-time ventilation ... [22] Is a self-sufficient building energy efficient? Lesson learned from a case study in ... [23] Actual validation of energy simulation and investigation of energy management ... [24] Comparative study of solar-powered underfloor heating system performance in ... [25] Climatic, parametric and non-parametric analysis of energy performance of double-glazed windows in ... [26] Thermal behavior of building transparent envelope: Efficient solar envelope for Kerman ...

*Architecture Department, Architecture Faculty, Bradsir Branch, Islamic Azad University, Bardsir, Iran

*Correspondence

Address: Bradsir Branch, Islamic Azad University, Ayatollah Hashemi Rafsanjani Boulevard, Bardsir, Kerman, Iran. Postal Code: 7841669631
Phone: +98 (34) 33523301
Fax: +98 (34) 33527009
fallah@bardsiriau.ac.ir

Article History

Received: November 1, 2018

Accepted: June 20, 2019

ePublished: September 21, 2019

تعیین نسبت بهینه پنجره به دیوار در جبهه جنوبی ساختمان‌های آموزشی در کرمان

حسین فلاح^{PhD}

گروه معماری، دانشکده معماری، واحد بردسیر، دانشگاه آزاد اسلامی، بردسیر، ایران

چکیده

مصرف انرژی ساختمان به شدت به مشخصات حرارتی پوسته خارجی آن وابسته است. در این میان، پنجره‌ها به دلیل مقاومت حرارتی کم در کنار عبور مستقیم انرژی تابشی، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مشخصات حرارتی پوسته ساختمان دارند. بنابراین تعیین نسبت بهینه پنجره به دیوار در هر اقلیم اهمیت بسیار زیادی دارد. هدف از این پژوهش تعیین متغیرهای تاثیرگذار بر نسبت بهینه پنجره به دیوار در جبهه جنوبی شهر کرمان براساس مشخصات حرارتی پوسته ساختمان است. روش تحقیق، ترکیبی از برداشت میدانی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری است. در برداشت میدانی، نسبت پنجره به دیوار جنوبی در ۲۶ تک‌فضا مربوط به ۱۶ نمونه از خانه‌ها و مدرسه‌های تاریخی شهر کرمان اندازه‌گیری، ترسیم و تحلیل شدند. نتایج نشان داد نسبت پنجره به دیوار ۵ تا ۱۵٪ بیشترین فراوانی را بین نمونه‌های برداشت شده داشته است. در شبیه‌سازی نرم‌افزاری، ضریب انتقال حرارت پنجره و دیوار و همچنین ضریب بهره حرارتی خورشیدی با در نظر گرفتن بار حرارتی سالیانه تحلیل، و در نهایت نسبت ۳۰٪ به عنوان نسبت بهینه پنجره به دیوار مشخص شد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت اگر صرفاً تحلیل حرارتی را مد نظر داشته باشیم، نسبت بهینه پنجره به دیوار در جبهه جنوبی دیوار در شهر کرمان، در صورت استفاده از شیشه‌های تک‌جلداره برابر ۱۵٪ و در صورت استفاده از پنجره دوجداره برابر ۳۰٪ می‌شود، مشروط بر آن که ضریب بهره حرارتی خورشیدی پنجره از ۰/۴ کمتر نباشد. نتایج پژوهش همچنین وابستگی زیاد بار حرارتی سالیانه ساختمان به ضریب بهره حرارتی خورشیدی پنجره‌ها را نشان داد. بر این اساس، در نهایت پیشنهاد اضافه‌شدن این شاخص به مشخصات حرارتی پنجره‌ها در پیوست ۹ مبحث ۱۹ ارایه شده است.

کلیدواژه‌ها: نسبت پنجره به دیوار، ضریب بهره حرارتی خورشیدی، جبهه جنوبی، بهینه‌سازی انرژی، معماری سنتی، شهر کرمان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۳۰

*نویسنده مسئول: fallah@bardsiriau.ac.ir

مقدمه

سطوح شیشه‌ای وسیع که در دوره مدرن در معماری متداول شد، کماکان مورد توجه جامعه معماری قرار دارد. سطوح شیشه‌ای وسیع می‌تواند میان فضای داخلی و فضای خارجی ارتباط برقرار کند و احساس مدرن و روزآمد بودن ساختمان را به مخاطب القا کند. با این حال، برخی مطالعات هشدار می‌دهند که این سطوح وسیع شیشه‌ای ممکن است مشکلاتی را از نظر صرفه‌جویی انرژی و آسایش حرارتی برای استفاده‌کنندگان ایجاد کند. از جمله مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، کاهش حداکثری مقدار سطوح نورگذر نسبت به سطح پوسته خارجی را به عنوان یکی از اصول کلی در زمینه طراحی ساختمان پیشنهاد کرده است [1]، اما از طرف دیگر، مطالعات دیگری هم وجود دارند که نسبت بهینه پنجره به دیوار را حتی تا ۸۰٪ جدار خارجی نیز قابل افزایش می‌دانند [2]. سئوالی که در اینجا مطرح می‌شود، آن است که چگونه می‌توان از بین این توصیه‌های متناقض، مناسب‌ترین حالت را برای ساختمان‌ها در نظر گرفت؟ یا

به‌طور واضح‌تر، چه عواملی بر نسبت بهینه پنجره به دیوار اثرگذار هستند؟ و نسبت بهینه پنجره به دیوار برای جبهه جنوبی ساختمانی (برای مثال واقع در شهر کرمان) چقدر است؟ این پژوهش قصد دارد با بررسی ساختمان‌های سنتی و مقایسه آنها با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری به این سئوال‌ها پاسخ گوید.

برای پاسخ‌گویی به این سئوال‌ها، پس از مرور مختصر جدیدترین پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه بهینه‌یابی نسبت پنجره به دیوار، به منظور مشخص کردن نسبت بهینه پنجره به دیوار در جبهه جنوبی شهر کرمان از دو روش مختلف بهره برده‌ایم: در روش اول، ۱۶ نمونه ساختمان سنتی در شهر کرمان انتخاب، و زوایای سایه‌اندازی و نسبت پنجره به دیوار در ۲۶ تک‌فضا از این ساختمان‌ها برداشت شده‌اند. همچنین مساحت سطوح شفاف و کدر و نسبت پنجره به دیوار برای کل جبهه جنوبی این ۱۶ ساختمان نیز به صورت مجزا محاسبه شده است. با توجه به این که نوع مصالح انتخابی بر نسبت بهینه پنجره به دیوار تاثیر زیادی دارد (و مصالح متداول در ساخت‌وسازهای امروزی با مصالح سنتی تفاوت‌های زیادی دارند)، در مرحله دوم تحقیق شبیه‌سازی در نرم‌افزار DesignBuilder™ و با استفاده از مصالح متداول در ساخت‌وساز انجام شد. به این صورت با شبیه‌سازی ۴۸۰ مدل متفاوت در این نرم‌افزار، مناسب‌ترین نسبت پنجره به دیوار (براساس حداقل میزان بار حرارتی سرماایش/گرمایش ساختمان) به دست آمد. در ادامه، پس از مرور مختصر پیشینه مطالعات در خصوص بهینه‌یابی نسبت پنجره به دیوار، نتایج هر دو بخش از پژوهش ارایه می‌شود.

پیشینه تحقیق

نتایج بررسی مطالعات اخیر انجام‌شده در زمینه بهینه‌یابی نسبت پنجره به دیوار در جدول ۱ ذکر شده‌اند. گفتنی است در این جدول، ضریب انتقال حرارت دیوار با U_w ، ضریب انتقال حرارت سقف با U_c ، ضریب انتقال حرارت کف با U_f ، ضریب انتقال حرارت پنجره‌ها با U_g ، ضریب انعکاس دیوارها، سقف و کف به ترتیب با R_c ، R_w و R_f ، ضریب بهره حرارتی خورشیدی پنجره با $SHGC$ ، و ضریب عبور مری پنجره‌ها با T_{vis} مشخص شده است. ضمناً تمامی واحدها براساس دستگاه SI گزارش شده است. این جدول، به خوبی پراکندگی و تفاوت بین نسبت بهینه پنجره به دیوار را در مطالعات مختلف نشان می‌دهد.

از مرور مطالعات پیشین، می‌توان نتیجه گرفت عمده اختلافات مشاهده‌شده در خصوص نسبت بهینه پنجره به دیوار به دو مورد زیر بر می‌گردد؛ بنابراین توجه به این دو مورد در بررسی‌ها ضروری می‌نماید:

الف) شرایط اقلیمی: در مناطق با اختلاف زیاد درجه حرارت در روز و شب (نظیر لیبی یا عربستان)، نسبت پنجره به دیوار حداقل بوده است، (بین صفر تا ۱۰٪ در برخی مطالعات) [3, 4]، در حالی که در مناطق با نوسان روزانه اندک (نظیر کره جنوبی یا هلند) نسبت بهینه پنجره به دیوار می‌تواند افزایش یابد (بین ۵۰ تا ۸۰٪ در برخی مطالعات) [2, 17].

منبع	نتایج	ویژگی‌های حرارتی جدارها	روش بررسی	موقعیت
[3]	WWR به‌طور متوسط عامل ۲۰٪ بار سرمایش و ۱۱٪ از بار گرمایش ساختمان است	$U_w = 0.15-0.365$; $U_g = 2.84$ $SHGC = 0.2-0.7$	مطالعات تجربی در نسبت پنجره به دیوار ۲۵٪ تا ۵۲٪	آمریکا
[4]	حداقل مصرف انرژی در شرایط WWR صفر رخ می‌دهد و افزایش WWR از ۱۰٪ تا ۹۰٪ مصرف انرژی را ۶٪ تا ۱۸۱٪ افزایش می‌دهد.	$U_w = 2.77$; $SHGC = 0.764$ $T_{vis} = 0.8$	بررسی تاثیر WWR بین ۰٪ تا ۹۰٪ در جبهه‌های مختلف بر مصرف انرژی سرمایش/گرمایش در نرم‌افزار Openstudio	طرابلس، لیبی
[5]	در مناطق گرم حداکثر WWR باید ۱۰٪ و در مناطق معتدل حداکثر WWR باید ۲۰٪ باشد	$U_w = 0.43$; $U_f = 0.316$ $U_c = 0.274$; $U_g = 5.53$ $T_{vis} = 0.7$	مدل‌سازی در نرم‌افزار TAS EDSL به همراه اندازه‌گیری‌های تجربی	سه شهر عربستان
[6]	بهترین نسبت WWR در جبهه جنوبی ۲۰٪، در جبهه شمالی ۱۵٪ و در جبهه‌های شرقی و غربی ۵٪ است	$U_w = 0.82-1.34$; $U_f = 0.76-1.95$ $U_c = 0.8-1.59$; $U_g = 4.76-5.77$	بهینه‌سازی انرژی در نرم‌افزار DesignBuilder به نحوی که فاکتور نور روز حداقل ۲٪ باشد.	شیراز
[7]	در جبهه جنوبی، بهترین عملکرد با WWR ۱۵٪ تا ۲۵٪ ایجاد می‌شود و حداکثر WWR پذیرفتنی، ۵۰٪ است.	$U_w = 0.98$; $U_g = 2.8$ $SHGC = 0.77$; $T_{vis} = 0.77$ $R_w = 0.6$; $R_c = 0.85$; $R_f = 0.4$	تاثیر WWR بر آسایش فضایی به روش SolarCal و اندازه‌گیری‌های میدانی	تهران، ایران
[8]	اتاق‌ها در شرایط WWR برابر ۲۵٪، بازه بیشتری را در محدوده آسایش سپری کردند.	گزارش نشده	اندازه‌گیری دما با تغییر WWR به ۲۵٪ و ۵۰٪ در دو اتاق رو به شرق/غرب	مالزی
[9]	میانگین WWR بهینه در شرایط استفاده از دیوارها و پنجره‌های دارای عایق حرارتی متداول بین ۲۳٪ تا ۲۵٪/۹، و در شرایط استفاده از پنجره‌های انتخابگر طیفی ۳۱٪/۶	$U_w = 0.254-2.98$; $U_c = 0.38$ $U_f = 0.421-0.495$; $U_g = 3.2$ $1/87$	تاثیر WWR ۸٪ تا ۵۳٪ بر مصرف انرژی سرمایش/گرمایش/روشنایی در سه تیپ ساختمان اداری در نرم‌افزار EnergyPlus	۱۲ شهر ایتالیا
[10]	بهترین عملکرد در WWR برابر ۳۰٪، R_w برابر ۰/۸ و جهت‌گیری جنوبی حاصل می‌شود.	$R_w = 0.4$; 0.5 ; 0.6 ; 0.7 ; 0.8	تاثیر WWR ۳۰٪ تا ۸۰٪، جهت‌گیری پنجره و ضریب انعکاس دیوارهای داخلی بر عملکرد روشنایی روز در نرم‌افزار Daysim	اندونزی
[11]	بهترین نسبت پنجره به دیوار در جبهه‌های مختلف بین ۳۵ تا ۴۵ درصد است.	$U_w = 0.15$; $U_g = 0.7$ $SHGC = 0.46$	تاثیر WWR ۲۰٪ تا ۸۰٪ در جبهه‌های مختلف ساختمانی اداری بر مصرف انرژی سرمایش/گرمایش/روشنایی در نرم‌افزار EnergyPlus	فرانکفورت، آلمان
[12]	WWR ۳۰٪ تا ۴۰٪، بیشترین سطح روشنایی بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ لوکس را ایجاد می‌کند	گزارش نشده	تاثیر WWR ۱۵٪ تا ۶۰٪ بر کارایی نور روز در نرم‌افزار Ecotect	تهران، ایران
[13]	WWR بهینه در اقلیم بسیار سرد و مرطوب (Dfb) به ۶۰٪ و در اقلیم مدیترانه‌ای (Csa) به ۲۰٪ می‌رسد.	$U_w = 0.15$; $U_g = 0.7$ $SHGC = 0.46$	تاثیر WWR ۲۰٪ تا ۸۰٪ در جبهه‌های مختلف ساختمانی اداری بر مصرف انرژی سرمایش/گرمایش/روشنایی در نرم‌افزار EnergyPlus	اقلیم‌های مختلف
[14]	WWR بهینه در جبهه شرقی، غربی، شمالی و جنوبی به ترتیب ۴٪، ۲٪، ۲۰٪ و ۳۵٪ است.	$U_w = 0.5$; $U_c = 0.5$; $U_g = 1.8$	بهینه‌سازی مصرف انرژی و آسایش حرارتی در طراحی ساختمان به روش الگوریتم ژنتیک چندهدفه	چین
[15]	کمترین میزان مصرف انرژی در نسبت پنجره به دیوار ۳۳٪ حاصل می‌شود.	$U_w = 0.34$; 0.15 ; 0.16 ; 1.95 $U_c = 0.6$; 0.18 ; 0.53 $U_f = 0.34$; 1.95 ; $U_g = 2.774$ $T_{vis} = 0.812$; $SHGC = 0.765$	تاثیر WWR ۳۳٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ بر مصرف انرژی سرمایش/گرمایش/روشنایی در نرم‌افزار EnergyPlus	سئول، کره جنوبی
[16]	WWR در مناطق با نوسان زیاد دمای روزانه باید کاهش و در صورت استفاده از پنجره با U-Value بالا می‌تواند افزایش یابد.	$U_w = 0.203$ 0.365 ; 0.857 ; 1.998 ; 3.293 0.203	تاثیر تغییرات U-Value و نوسان روزانه دمای خارج را بر حداکثر WWR پذیرفتنی	هفت شهر آمریکا
[17]	در صورت استفاده از دیوارها و پنجره‌های با U-Value کم، WWR بهینه می‌تواند تا ۵۰٪ برسد	$U_w = 0.25$; 0.37 ; 2.22 $U_f = 0.15$; 0.37 ; 1.91 $U_g = 1.095-5.67$; $T_{vis} = 0.44-0.74$	تاثیر WWR ۳۰٪ تا ۱۰۰٪ بر صرفه‌جویی انرژی در نرم‌افزار DesignBuilder	دلف، هلند
[2]	WWR بهینه در شرایط استفاده از مصالح متداول بین ۲۰٪ تا ۴۰٪ است؛ اما سایه‌اندازی و سیستم کنترل هوشمند سبب افزایش WWR بهینه تا ۸۰٪ می‌شود.	$U_g = 1.4-2.1$; $SHGC = 0.4-0.6$	تاثیر تغییر مشخصات پنجره و نسبت WWR بر بار سرمایی/گرمایی در نرم‌افزار COMFEN	کره جنوبی

ب) ویژگی‌های حرارتی پنجره‌ها و دیوارها: پنجره‌ها عملاً ضعیف‌ترین بخش ساختمان از لحاظ انتقال حرارت به‌شمار می‌روند. بنابراین شاید بتوان مهم‌ترین دلیل پیشنهاد منابعی نظیر مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان مبنی بر لزوم کاهش نسبت پنجره به دیوار را، ضریب انتقال حرارت زیاد پنجره‌ها دانست. این در حالی است که دیگر ویژگی‌های پنجره نظیر ضریب بهره حرارتی خورشیدی پنجره‌ها می‌تواند با کسب حرارت از خورشید در مواقع نیاز، بر کاهش بار گرمایی ساختمان اثرگذار باشد. بنابراین در زمان انتخاب نوع و مساحت پنجره‌ها، علاوه بر ضریب انتقال حرارت، توجه به ضریب بهره‌حرارتی خورشیدی پنجره‌ها هم اهمیت دارد. *حقوق‌شناس* در سال ۱۳۸۸ نشان داده است در صورتی که عایق‌کاری حرارتی ساختمان (کاهش ضریب انتقال حرارت پنجره) با بی‌توجهی نسبت به ضریب بهره حرارتی پنجره‌ها یا وضعیت سایه‌اندازی آنها همراه شود، ممکن است شرایط بسیار نامطلوبی را از نظر آسایش حرارتی برای ساکنین فراهم آورد، زیرا به‌دلیل جلوگیری از اتلاف حرارت از طریق جداره‌های خارجی، تابش خورشید در فضاهای داخل در اوقات گرم و حتی معتدل باعث افزایش دما به میزان زیاد شده و ساکنان را به استفاده از وسایل خنک‌کننده ترغیب می‌کند [18].

بررسی نسبت پنجره به دیوار در ساختمان‌های سنتی

در آثار تاریخی معماری ایران، نورگیرهای متنوعی برای تامین شرایط آسایش حرارتی و روشنایی فضاهای داخلی وجود دارد که اصلی‌ترین آنها در پنجره‌ها و ارسی‌ها هستند. سطوح نورگذر در دیوارهای رو به تابش خورشید (به‌طور خاص، دیوارهای رو به جنوب)، منبع مناسبی برای تامین شرایط گرمایی در فصل سرد محسوب می‌شوند. به‌منظور استفاده از تجارب پیشینیان، نسبت سطح نورگذر به دیوار جنوبی اتاق‌ها و حجره‌ها در ۲۶ تک‌فضا مربوط به ۱۶ نمونه از خانه‌ها و مدرسه‌های تاریخی شهر کرمان به‌صورت برداشت‌های میدانی اندازه‌گیری و در نرم‌افزار اتوکد ترسیم شدند. سپس نسبت مساحت پنجره به دیوار جنوبی هر یک از آنها در فایل ترسیمی مشخص شد. نمونه‌های بررسی‌شده شامل خانه‌های امینیان، نیک‌اندیش، اعظمی، اشیدری، بانگ‌توکل، پورثانی، فرخ‌زاد، سروشیان، لطفعلی‌زاده، فروزنده، یزدان‌پناه، و کریم‌نژاد و مدرسه‌های ابراهیم‌خان، محمودیه، معصومیه، و حیاتی بودند. از این بین، مدارس محمودیه و معصومیه مربوط به دوره صفوی، خانه سروشیان مربوط به پهلوی اول و سایر بناهای بررسی‌شده مربوط به دوره قاجار بودند. نتایج بررسی نسبت پنجره به دیوار در ساختمان‌های سنتی در جدول ۲ ذکر شده است. لازم به ذکر است از آنجایی که در تمامی نمونه‌های بررسی‌شده، زوایای اشاره‌شده برای زاویه سایبان عمودی (VSA) به‌صورت متقارن هم در شرق و هم در غرب پنجره وجود داشته است، از ذکر عبارت شرقی/غربی در زاویه سایبان عمودی خودداری شده است. دامنه نسبت پنجره به دیوار در تک‌فضاها از ۷/۳٪ تا ۳۴/۴٪ متغیر بوده و میانگین WWR در تک‌فضاها ۱۳/۲٪ (با انحراف‌معیار ۶٪) بوده است.

در بررسی کل نمای جنوبی ساختمان‌ها هم نتایج تقریباً مشابهی به دست آمد. دامنه WWR کل نمای جنوبی ساختمان‌ها از ۸٪ تا ۳۷٪ نوسان داشته است و متوسط WWR آن ۱۲/۹٪ (با انحراف‌معیار ۷٪) بوده است. به‌منظور بررسی بهتر، نسبت‌های پنجره به دیوار در تک‌فضاها و ساختمان‌ها به پنج گروه زیر تقسیم‌بندی شدند. از بین ۲۶ تک‌فضای بررسی‌شده، ۱۰ مورد آنها WWR بین ۵ تا ۱۰٪ و ۹ مورد آنها WWR بین ۱۰ تا ۱۵٪ داشته‌اند. در مقابل، نسبت WWR هم در ۵ تک‌فضا بین ۱۵ تا ۲۰٪ بوده است. به‌عبارت دیگر، بیشترین فراوانی WWR تک‌فضاها در گروه‌های ۵ تا ۱۵٪ دیده می‌شود (نمودار ۱).

با بررسی WWR در کل نمای جنوبی ساختمان‌ها هم، نتایج تقریباً مشابهی به دست آمد. از بین ۱۶ بنای بررسی‌شده، ۶ مورد آنها WWR بین ۵ تا ۱۰٪ و ۷ مورد آنها WWR بین ۱۰ تا ۱۵٪ داشته‌اند. در مقابل، WWR فقط در دو ساختمان بین ۱۵ تا ۲۰٪ و فقط در یک ساختمان بین ۳۰ تا ۳۵٪ بوده است. به‌عبارت دیگر، در بررسی کل نمای جنوبی هم بیشترین فراوانی در WWR بین ۵ تا ۱۵٪ دیده می‌شود (نمودار ۱). و این بدان معنی است که چه در تک‌فضاها و چه در کل نمای جنوبی، حداقل نسبت پنجره به دیوار استفاده شده است. این نتایج، تاییدکننده بررسی‌های *القول* و همکاران است که مشخص کردند در مناطق گرم (و درصورت استفاده از مصالح بنایی) بهترین بازدهی انرژی در شرایط استفاده حداقل از پنجره حاصل می‌شود [4].

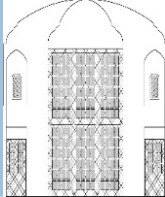


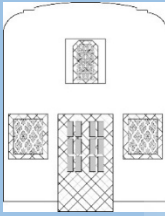

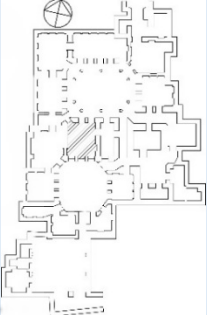
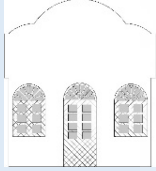

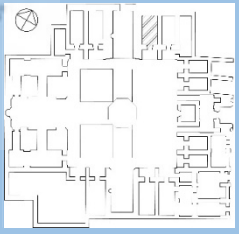


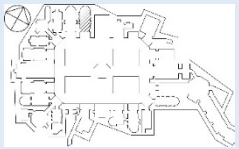
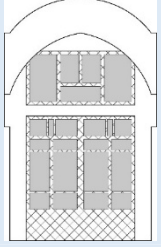

از این منظر، شاید در نگاه اول تاکید مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان بر کاهش سطوح پنجره در جدار خارجی ساختمان صحیح به نظر برسد. اما باید توجه داشت این نسبت‌ها در شرایطی به دست آمده‌اند که در ساختمان‌ها، پنجره‌هایی تک‌جداره استفاده می‌شده است که عایق حرارتی و هوابندی ضعیفی داشته‌اند. بنابراین شاید نتوان نتایج این بررسی در خصوص نسبت WWR در ساختمان‌های سنتی را به آن دسته از ساختمان‌های امروزی که از عایق حرارتی و پنجره‌های دوجداره استفاده می‌کنند، تعمیم داد (نمودار ۱).


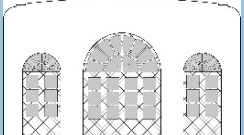
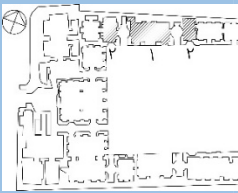

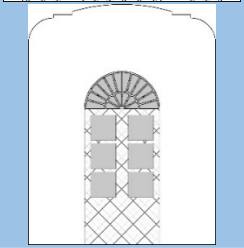


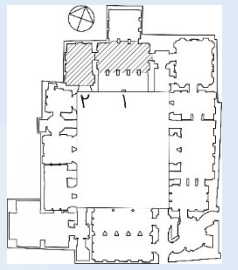

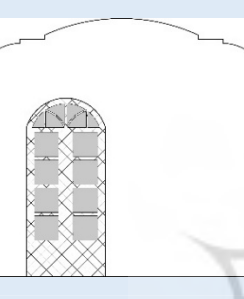

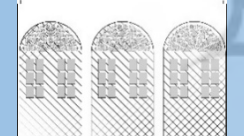
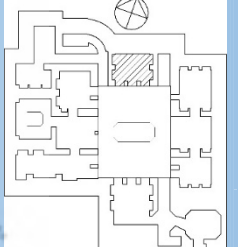
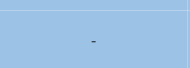
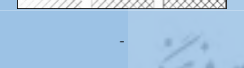

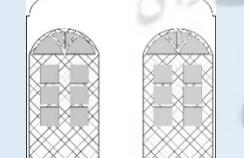
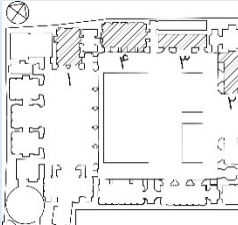

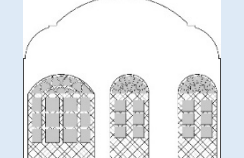

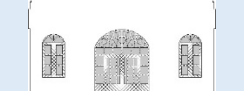
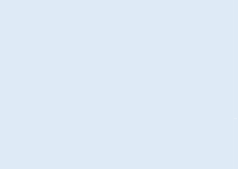




نمودار نقطه‌ای بین نسبت پنجره به دیوار و زاویه سایبان افقی پنجره نمونه ساختمان‌های بررسی‌شده در نمودار ۲ مشخص شده است. رگرسیون خطی بین این دو متغیر نشان می‌دهد، همبستگی مثبتی بین نسبت پنجره به دیوار و زاویه سایبان افقی (HSA) وجود دارد به‌نحوی که با افزایش نسبت پنجره به دیوار، زاویه سایبان افقی هم (با نسبتی برابر ۰/۸۳) افزایش می‌یابد. عدد ضریب تعیین (R^2) در این رابطه برابر ۰/۱۲ است که نشان می‌دهد ۱۲٪ از تغییرات زاویه سایبان افقی، به‌وسیله نسبت پنجره به دیوار تبیین می‌شود. از طرف دیگر، ضریب همبستگی اسپیرمن بین نسبت پنجره به دیوار و زاویه سایبان افقی برابر ۰/۴۷ است که همبستگی متوسطی را بین نسبت پنجره به دیوار و زاویه سایبان افقی نشان می‌دهد. این ضریب همبستگی در سطح معنی‌داری برابر با ۰/۱۵ > ۰/۰۵ معنی‌دار است. این در حالی است که بین WWR و زاویه سایبان عمودی (VSA) رابطه معنی‌داری به دست نیامد. دلیل این امر را می‌توان در بررسی


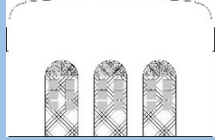
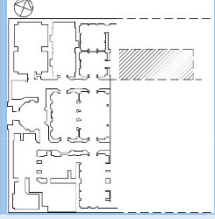

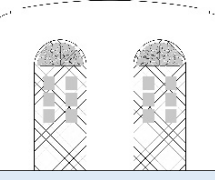
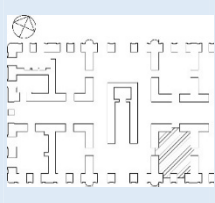

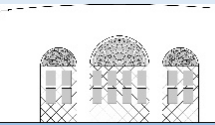
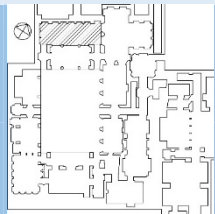

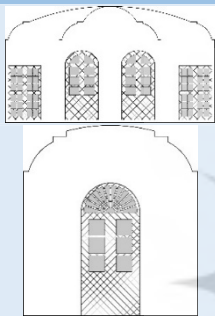
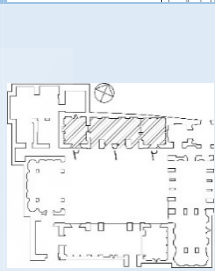
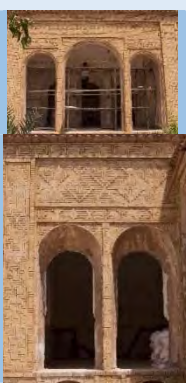
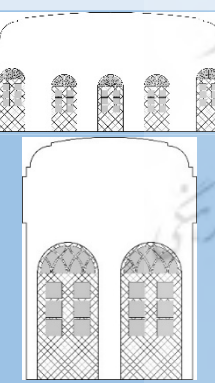
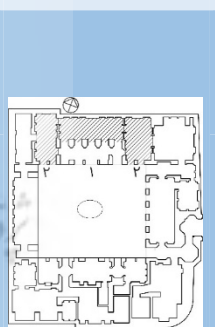
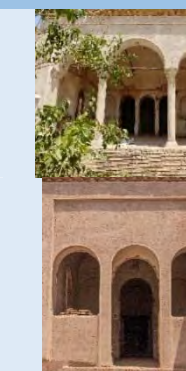

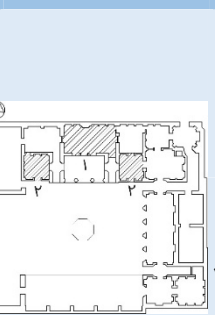
تعیین نسبت بهینه پنجره به دیوار در جبهه جنوبی ساختمان‌های آموزشی در کرمان ۱۰۹
ارتباط بین WWR در جبهه جنوبی با زاویه سایه‌اندازی عمودی (VSA) توجیه‌پذیر خواهد بود (نمودار ۲).


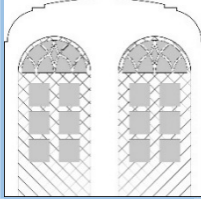

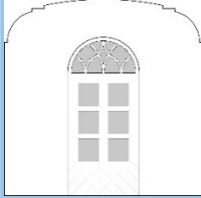

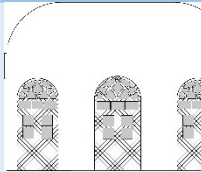
صرف جبهه جنوبی در این پژوهش جست‌وجو کرد. در جبهه جنوبی ساختمان، عمدتاً به سایبان‌های افقی نیاز است و بنابراین عدم

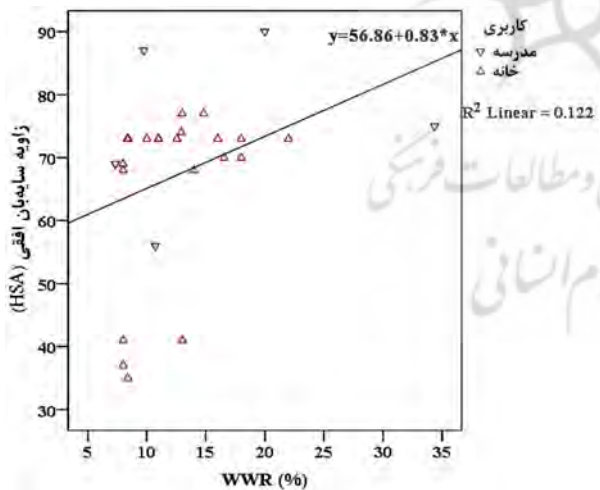
جدول ۲) مشخصات نمونه ساختمان‌های بررسی‌شده

مشخصات بنا	مشخصات فضا	مجموع مساحت نما (مترمربع)	مجموع مساحت بخش‌های غیرشفاف نما (مترمربع)	مجموع مساحت بخش‌های شفاف نما (مترمربع)	WWR(%)	زاویه سایه‌بان عمودی VSA	زاویه سایه‌بان افقی HSA	تصویر ترسیم‌شده	تصویر نمای واقعی
مدرس- ۱		۵۱/۳۳۷	۴۱/۰۷۰	۱۰/۲۶۷	۲۰	۸۹°	۸۹°		
مدرسه علمیه ابراهیم‌خان حجره- ۲		۱۲/۲۷۶	۱۱/۳۷۴	۰/۹۰۱	۷	۵۳°	۶۹°		
کل نمای جنوبی		۱۲۴/۹۹۳	۱۰۹/۳۶۸	۱۵/۶۲۴	۱۲/۵	-	-		
مدرسه حیاتی کلاس		۲۴/۴۵۸	۲۲/۰۷۷	۲/۳۸۱	۱۰	۸۴°	۸۷°		
کل نمای جنوبی		۲۴/۴۵۸	۲۲/۰۷۷	۲/۳۸۱	۱۰	-	-		
مدرسه علمیه محمودیه حجره		۹/۹۴۱	۸/۸۷۵	۱/۰۶۶	۱۱	۴۳°	۵۶°		
کل نمای جنوبی		۳۹/۷۶۴	۳۵/۳۸۹	۴/۳۷۴	۱۱	-	-		
مدرسه علمیه معصومیه حجره		۱۱/۴۷۲	۷/۵۲۹	۳/۹۴۳	۳۴	۶۷°	۷۵°		
کل نمای جنوبی		۳۴/۴۱۶	۲۱/۶۸۲	۱۲/۷۳۳	۳۷	-	-		

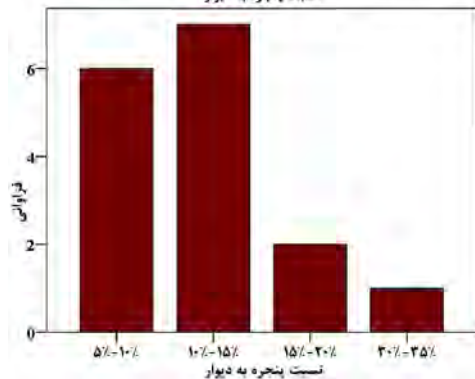
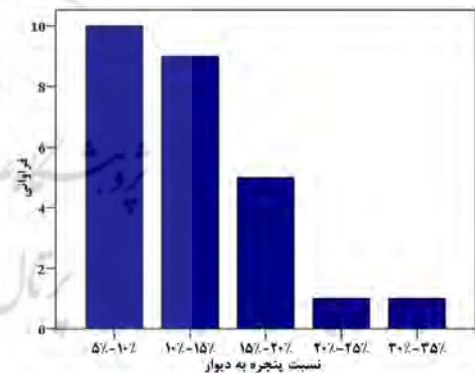
		۷۷°	۶۱°	۱۵	۶/۴۸۷	۳۷/۲۶۰	۴۳/۷۴۸		سهدری-۱	خانه اشیدری زمستان‌نشی ن-۲
		۷۳°	۶۵°	۱۲/۵	۱/۳۸۷	۹/۶۶۵	۱۱/۵۵۲		کل نمای جنوبی	
		۷۳°	۶۵°	۱۰	۱/۹۱۲	۱۷/۲۰۸	۱۹/۱۲۰		پنچ‌دری-۱	خانه امینیان زمستان‌نشی ن-۲
		۷۳°	۶۵°	۸	۰/۸۳۸	۹/۱۹۰	۱۰/۰۲۹		کل نمای جنوبی	
		۶۸°	۶۱°	۸	۰/۷۴۰	۸/۵۲۰	۹/۲۶۱		سهدری	خانه اعظمی
		-	-	۸	۰/۷۴۰	۸/۵۲۰	۹/۲۶۱		کل نمای جنوبی	
		۷۰°	۶۰°	۱۸	۱/۵۶۰	۷/۱۰۸	۸/۶۶۸		دودری-۱	خانه بانگ توکلی زمستان‌نشی ن-۲
		۷۰°	۶۰°	۱۷	۳/۲۱۸	۱۶/۲۲۱	۱۹/۴۳۹		زمستان‌نشی ن-۳	
		۷۴°	۷۲°	۱۳	۳/۹۱۹	۲۶/۴۰۲	۳۰/۳۲۲		پنچ‌دری-۴	خانه بانگ توکلی زمستان‌نشی ن-۳
		۷۳°	۶۱°	۱۸	۴/۴۹۴	۲۰/۴۷۷	۲۴/۹۷۲		کل نمای جنوبی	
		-	-	۱۷	۱۴/۷۵۱	۷۲/۹۳۰	۸۷/۶۸۳			

		۴۱°	۵۹°	۸	۲/۲۰۳	۲۵/۳۳۶	۲۷/۵۳۹		سهدری	خانه پورثانی
		-	-	۸	۲/۲۰۳	۲۵/۳۳۶	۲۷/۵۳۹		کل نمای جنوبی	
		۷۳°	۵۹°	۸/۵	۱/۱۹۰	۱۲/۹۴۸	۱۴/۱۳۸		دودری	خانه سروشیان
		-	-	۸/۵	۴/۸۰۶	۵۱/۷۴۵	۵۷/۵۵۲		کل نمای جنوبی	
		۴۱°	۵۷°	۱۳	۵/۶۸۷	۳۸/۰۶۱	۴۳/۷۴۸		سهدری	خانه کریم‌نژاد
		-	-	۱۳	۵/۶۸۷	۳۸/۰۶۱	۴۳/۷۴۸		کل نمای جنوبی	
		۶۸°	۶۰°	۱۴	۳/۴۹۰	۲۱/۴۴۲	۲۴/۹۳۳		زمستان نشین- ۱	خانه لطفعلی‌زاده
		۶۹°	۶۰°	۸	۰/۸۴۳	۹/۷۰۴	۱۰/۵۴۸		زمستان نشین- ۲	
		-	-	۱۱	۵/۰۶۳	۴۰/۹۶۵	۴۶/۰۲۹		کل نمای جنوبی	
		۳۷°	۶۲°	۸	۳/۴۸۵	۴۰/۰۸۸	۴۳/۵۷۴		پنج‌دری- ۱	خانه فرخزاد
		۷۷°	۶۲°	۱۳	۱/۶۶۸	۱۱/۱۶۶	۱۲/۸۳۴		دودری- ۲	
-	-	-	-	۱۰	۶/۹۲۴	۶۲/۳۱۷	۶۹/۲۴۲	-	کل نمای جنوبی	
		۳۵°	۵۳°	۹	۲/۵۰۳	۲۷/۲۹۹	۲۹/۸۰۲		سهدری- ۱	خانه فروزنده
		۷۳°	۶۳°	۱۶	۲/۰۷	۱۰/۸۶۵	۱۲/۹۳۴		زمستان نشین- ۲	
		-	-	۱۲	۶/۶۸۰	۴۹/۰۲۷	۵۵/۶۷۰		کل نمای جنوبی	

		۷۳۰	۶۵°	۲۲	۲/۱۷۳	۷/۷۰۶	۹/۸۸۰	دودری-۱	خانه نیکان‌دیش
		۷۳۰	۶۵°	۱۱	۱/۰۸۶	۸/۷۹۳	۹/۸۸۰	زمستان‌نشین-۲	
		-	-	۱۶۷۵	۳/۲۶۰	۱۶/۴۹۹	۱۹/۷۶۰	کل نمای جنوبی	
		۷۳۰	۶۵°	۱۱	۳/۳۶۸	۲۷/۲۵۷	۳۰/۶۲۶	سه‌دری	خانه یزدان‌پناه
		-	-	۱۱	۳/۳۶۸	۲۷/۲۵۷	۳۰/۶۲۶	کل نمای جنوبی	



نمودار ۲) نمودار نقطه‌ای زاویه سایبان افقی در نسبت‌های مختلف پنجره به دیوار



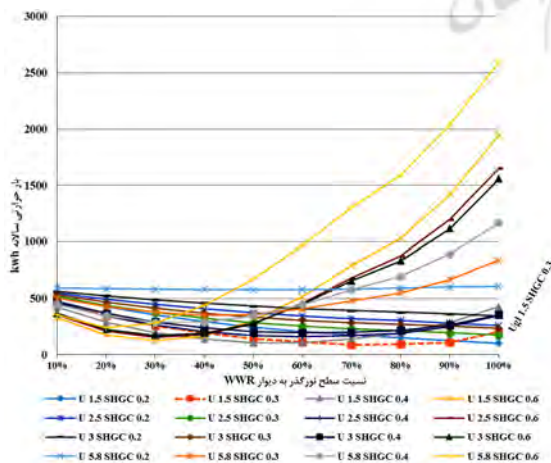
نمودار ۱) فراوانی گروه‌های مختلف نسبت پنجره به دیوار در تک‌فضاها (پایین) و کل جبهه جنوبی (بالا)

بررسی نسبت بهینه پنجره به دیوار در ساختمان‌های امروزی با توجه به این که نتایج بررسی ساختمان‌های سنتی را به‌دلیل تفاوت مصالح مورد استفاده آنها با مصالح امروز نمی‌توان به معماری امروز تعمیم داد، در ادامه پژوهش بر آن شدیم تا نسبت WWR بهینه را براساس مصالح متداول در ساختمان‌های امروزی مشخص کنیم. در انجام این بخش از پژوهش، از شبیه‌سازی

با در نظر گرفتن جایگشت‌های مربوط به ضریب بهره حرارتی خورشیدی و ضریب انتقال حرارت پنجره در ده نسبت مختلف پنجره به دیوار (۱۰٪ تا ۱۰۰٪)، در سه نوع دیوار مختلف (بلوک سفالی، لیکا، و پنل سبده‌ای) در مجموع ۴۸۰ مدل مختلف (۱۶۰ مدل به ازای هر یک از دیوارها) در نرم‌افزار شبیه‌سازی شدند. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای دیوارهای بلوک سفالی، لیکا و پنل سبده‌ای به ترتیب در نمودارهای ۳، ۴ و ۵ مشخص شده است [26].

نتایج شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری (نمودارهای ۳، ۴، و ۵) نشان می‌دهند پنجره‌ها در صورت داشتن SHGC برابر، بدون در نظر گرفتن ضریب انتقال حرارت‌شان، از الگوی یکسانی در تناسب WWR با بار حرارتی سالیانه پیروی می‌کنند. این موضوع، وابستگی زیاد نسبت بهینه پنجره به دیوار را به میزان SHGC پنجره‌ها مشخص می‌کند؛ به نحوی که در تمامی نمونه‌ها، نسبت بهینه پنجره به دیوار در SHGC برابر ۰/۶، حدود ۳۰٪، در SHGC برابر ۰/۴ حدود ۵۰٪، در SHGC برابر ۰/۳ حدود ۷۰٪ و در SHGC برابر ۰/۲ حدود ۷۰٪ بوده است. به عبارت دیگر، می‌توان نسبتی منفی بین ضریب بهره حرارتی خورشیدی پنجره و نسبت بهینه پنجره به دیوار را شناسایی کرد که با افزایش SHGC، درصد WWR بهینه کاهش می‌یابد.

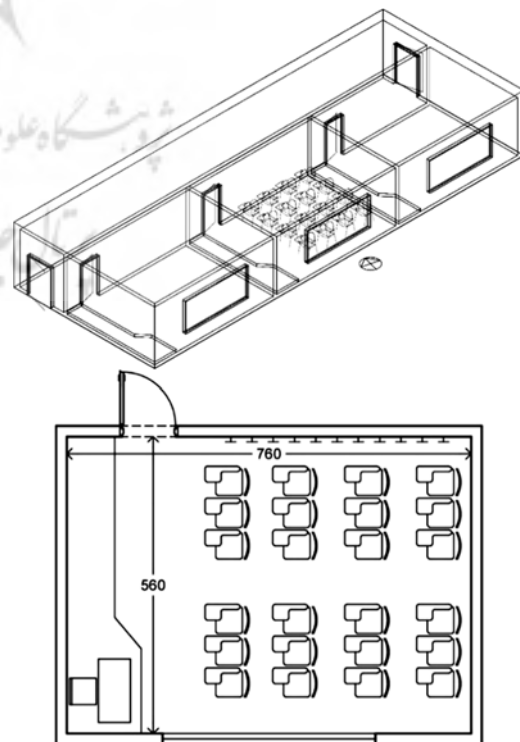
همچنین در تمامی نمونه پنجره‌ها و در تمامی مشخصات دیوارها، بار حرارتی ساختمان در WWRهای کمتر از ۴۰٪ اندک است؛ اما افزایش میزان SHGC پنجره سبب افزایش شدید بار حرارتی ساختمان در نسبت‌های پنجره به دیوار بیشتر از ۴۰٪ می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهند کاهش بیش از اندازه SHGC سبب کاهش تاثیر WWR بر بار حرارتی ساختمان می‌شود؛ از آنجایی که میزان بار حرارتی پنجره با مشخصات حرارتی $SHGC=0.2$ و $U_G=5.8$ در تمام نسبت‌های پنجره به دیوار تقریباً ثابت باقی مانده و نمودار آن در هر سه حالت از مشخصات دیوار، به صورت خطی تقریباً افقی درآمده است. نتایج در نهایت نشان می‌دهد پنجره‌ها در دیوار سبده‌ای (3DP) عملکرد حرارتی بهتری دارند. در همه دیوارها، کمترین بار حرارتی مربوط به پنجره $(SHGC=0.4, U_G=1/5)$ و بیشترین بار مربوط به پنجره $(SHGC=0.6, U_G=0/8)$ است.



نمودار (۳) بار حرارتی و بردتی سالانه کلاس با پوسته خارجی دیوار بلوک سفالی (HCB) [26]

رایانه‌ای با نرم‌افزار DesignBuilder™ استفاده شد. دیزاین‌بیلدر یکی از نرم‌افزارهای معتبر در زمینه محاسبات انرژی ساختمان است که در محاسبات حرارتی خود از موتور EnergyPlus و در محاسبات روشنایی خود از موتور Radiance استفاده می‌کند که هر دو از معتبرترین موتورهای محاسبه‌گر در زمینه انرژی در ساختمان هستند. نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر در سال‌های اخیر در بسیاری از مقاله‌های پژوهشی معتبر استفاده شده و اعتبار آن تایید شده است [19-24].

به منظور مشخص کردن نسبت پنجره به دیوار به کمک نرم‌افزار، یک فضای آموزشی ساده با مشخصات زیر در دیزاین‌بیلدر شبیه‌سازی شد: ابعاد کلاس (طول×عرض×ارتفاع) برابر ۳۲×۵۶×۷۶ سانتی‌متر بوده و در جبهه ۱۵ درجه جنوب شرقی یک پنجره دارد. نسبت پنجره به دیوار در مدل‌سازی‌ها از ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ تغییر کرده است. مشخصات حرارتی پنجره‌ها و دیوارها در این شبیه‌سازی‌ها، با توجه به مطالعات مشابه [25] انتخاب شد (شکل ۱). ضریب بهره حرارتی خورشیدی (SHGC) پنجره‌ها ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ و ضریب انتقال حرارت پنجره‌ها ۱/۵، ۲/۵، ۳، و ۵/۸ انتخاب شده‌اند. دیوارها نیز از سه جنس بلوک‌های سفالی توخالی (HCB) با ضریب انتقال حرارت $W.m^{-2}K^{-1}$ ۲/۳۲، لیکا (LCA) با ضریب انتقال حرارت $W.m^{-2}K^{-1}$ ۱/۰ و تری‌دی‌پنل (3DP) با ضریب انتقال حرارت $W.m^{-2}K^{-1}$ ۳/۵ در نظر گرفته شدند. فایل داده‌های هواشناسی شهر کرمان نیز با استفاده از دیتابیس نرم‌افزار Meteororm v7.1 تهیه شد. دیوارهای داخلی، کف و سقف بدون تبادل حرارت (آدیباتیک) در نظر گرفته شدند تا انتقال حرارت صرفاً از پوسته خارجی در جبهه جنوبی انجام شود (شکل ۱) [26].



شکل (۱) ابعاد و موقعیت کلاسی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر [26]

SHGC تقریباً مشابه، با وجود تفاوت قابل ملاحظه ضریب انتقال حرارت‌شان، از الگوی یکسانی در تناسب نسبت پنجره به دیوار با بار حرارتی سالیانه پیروی می‌کنند. در واقع در بسیاری از موارد، این ضریب بهره حرارتی خورشیدی پنجره (SHGC) است که الگوی تغییرات بار حرارتی را مشخص می‌کند نه ضریب انتقال حرارت آن. وابستگی نسبت بهینه پنجره به دیوار به ضریب بهره حرارتی خورشیدی پنجره‌ها در حدی است که تغییر ضریب SHGC پنجره از ۰/۶ به ۰/۲، نسبت بهینه پنجره به دیوار را از ۳۰٪ به ۷۰٪ افزایش می‌دهد. این موضوع، لزوم توجه بیشتر به بهره حرارتی خورشیدی پنجره در شرایط استفاده از پنجره‌های با ضریب انتقال حرارت کمتر (پنجره‌های دو و سه‌جداره) را خاطر نشان می‌سازد. نتایج تحلیل‌های نرم‌افزاری این پژوهش نشان داد در شرایط استفاده از پنجره‌های دو یا سه‌جداره (کاهش میزان ضریب انتقال حرارت پنجره)، افزایش میزان SHGC پنجره سبب افزایش بار سرمایش ساختمان می‌شود و در نتیجه نسبت بهینه پنجره به دیوار در این شرایط کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج مطالعات پیشین، دلیل این قضیه را می‌توان به دام‌افتادن حرارت در محیط داخلی ساختمان، در شرایط کاهش ضریب انتقال حرارت جدارها دانست. با در نظر گرفتن موارد فوق، در نهایت این پژوهش ایجاد تغییرات در چگونگی انتخاب پنجره در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان را پیشنهاد می‌کند. در پیوست ۹ مبحث ۱۹، در ذکر شرایط انتخاب پنجره‌های ساختمان و خصوصیات آنها، صرفاً ضریب انتقال حرارت شیشه و قاب مد نظر قرار گرفته است؛ در حالی که براساس نتایج این پژوهش، کاهش ضریب انتقال حرارت پنجره بدون توجه به ضریب بهره حرارتی خورشیدی (SHGC) آن نمی‌تواند به نتیجه مطلوب در صرفه‌جویی مصرف انرژی و کاهش بار حرارتی ساختمان منجر شود.

تشکر و قدردانی: بدین‌وسیله از استاد بزرگوار، جناب آقای دکتر محمدجواد مهدوی‌نژاد به‌واسطه یاری و حمایت‌های بی‌دریغ‌شان کمال تشکر را دارم. همچنین از گروه مطالعات میدانی که در برداشت بناهای تاریخی با اینجانب همکاری داشتند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

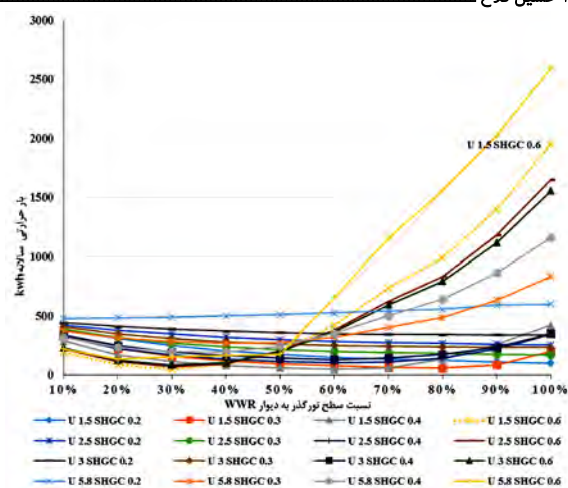
تأییدیه اخلاقی: نویسنده مقاله متعهد می‌شود که این مقاله تاکنون در هیچ نشریه فارسی یا زبان دیگری منتشر نشده است.

تعارض منافع: نویسنده اعلام می‌دارد هیچ‌گونه تعارض منافی وجود ندارد.

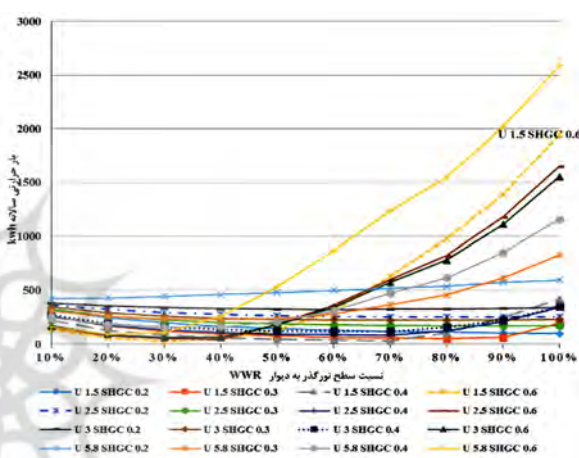
منابع مالی: هیچ‌گونه حمایت مالی از سوی نهادها و سازمان‌های مرتبط دریافت نشده است.

منابع

- 1- Building national code agency. Iranian building national code 19: Energy saving. Tehran: Nashr-e Tose'e-ye Iran; 2013. [Persian]
- 2- Kim SH, Kim SS, Kim KW, Cho YH. A study on the proposes of energy analysis indicator by the window



نمودار (۴) بار حرارتی و برودتی سالانه کلاس با پوسته خارجی لیکا (Leca) [26]



نمودار (۵) بار حرارتی و برودتی سالانه کلاس با پوسته خارجی دیوار سه‌جداره (3DP) [26]

نتیجه‌گیری

با بررسی مطالعات اخیر صورت‌گرفته در زمینه بهینه‌یابی نسبت پنجره به دیوار، این نتیجه حاصل شد که رایج‌ترین توصیه‌ای کلی مبنی بر حداقل استفاده از پنجره نمی‌تواند در تمامی مناطق چندان کارآمد باشد؛ چرا که عوامل زیادی بر نسبت بهینه پنجره به دیوار اثرگذار هستند. از جمله می‌توان به شرایط اقلیمی، ویژگی‌های حرارتی جدارها و پنجره‌ها، و سایه‌اندازی اشاره کرد. در خصوص شرایط اقلیمی، اختلاف درجه حرارت بین داخل و خارج و بیشتر شدن نوسان روزانه دما، سبب کاهش نسبت قابل توصیه WWR می‌شود. مقاومت حرارتی جدارها و مشخصات پنجره‌ها (ضرایب عبور مرئی، SHGC و U-Value) هم تاثیر عمده‌ای بر نسبت بهینه WWR دارد. در صورت استفاده از پنجره‌های با عملکرد بالا، نسبت WWR می‌تواند افزایش یابد. همچنین در صورت استفاده از سایه‌اندازی متناسب با جهت‌گیری پنجره نیز می‌توان نسبت WWR را افزایش داد.

نتایج پژوهش همچنین وابستگی زیاد بار حرارتی سالیانه ساختمان به میزان SHGC پنجره‌ها را نشان داد. به‌نحوی که شیشه‌های دارای

- 15- Kwon HJ, Yeon SH, Lee KH, Lee KH. Evaluation of building energy saving through the development of venetian blinds' optimal control algorithm according to the orientation and window-to-wall ratio. *Int J Thermophys*. 2018;39(2):30.
- 16- Ma P, Wang LS, Guo N. Maximum window-to-wall ratio of a thermally autonomous building as a function of envelope U-value and ambient temperature amplitude. *Appl Energy*. 2015;146:84-91.
- 17- Raji B, Tenpierik MJ, van den Dobbelen A. An assessment of energy-saving solutions for the envelope design of high-rise buildings in temperate climates: a case study in the Netherlands. *Energy Build*. 2016;124:210-21.
- 18- Haghshenas M. An approach to design and calculation of new Spectral Solar Shader (and its effect on daylight and energy of the building) [Dissertation]. Tehran: University of Tehran; 2009. [Persian]
- 19- Yang X, Hu M, Wu J, Zhao B. Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on carbon footprint accounting for a residential building in China. *J Clean Prod*. 2018;183:729-43.
- 20- Samaan MM, Farag O, Khalil M. Using simulation tools for optimizing cooling loads and daylighting levels in Egyptian campus buildings. *HBRC J*. 2018;14(1):79-92.
- 21- Ran J, Tang M. Passive cooling of the green roofs combined with night-time ventilation and walls insulation in hot and humid regions. *Sustain Cities Soc*. 2018;38:466-75.
- 22- de Rubeis T, Nardi I, Ambrosini D, Paoletti D. Is a self-sufficient building energy efficient? Lesson learned from a case study in Mediterranean climate. *Appl Energy*. 2018;218:131-45.
- 23- Fathalian A, Kargarsharifabad H. Actual validation of energy simulation and investigation of energy management strategies (Case Study: An office building in Semnan, Iran). *Case Stud Therm Eng*. 2018;12:510-6.
- 24- Karimi MS, Fazelpour F, Rosen MA, Shams M. Comparative study of solar-powered underfloor heating system performance in distinctive climates. *Renew Energy*. 2019;130:524-35.
- 25- Banihashemi S, Golizadeh H, Hosseini MR, Shakouri M. Climatic, parametric and non-parametric analysis of energy performance of double-glazed windows in different climates. *Int J Sustain Built Environ*. 2015;4(2):307-22.
- 26- Fallah H. Thermal behavior of building transparent envelope: Efficient solar envelope for Kerman educational buildings [Dissertation]. Tehran: Tarbiat Modares University; 2016. [Persian]
- elements of office buildings in Korea. *Energy Build*. 2014;73:153-65.
- 3- Yong SG, Kim JH, Gim Y, Kim J, Cho J, Hong H, et al. Impacts of building envelope design factors upon energy loads and their optimization in US standard climate zones using experimental design. *Energy Build*. 2017;141:1-15.
- 4- Alghoul SK, Rijabo HG, Mashena ME. Energy consumption in buildings: a correlation for the influence of window to wall ratio and window orientation in Tripoli, Libya. *J Build Eng*. 2017;11:82-6.
- 5- Alwetaishi M. Impact of glazing to wall ratio in various climatic regions: a case study. *J King Saud Univ Eng Sci*. 2019;31(1):6-18.
- 6- Zomorodian ZS, Nasrollahi F. Architectural design optimization of school buildings for reduction of energy demand in hot and dry climates of Iran. *Int J Archit Eng Urban Plan*. 2013;23(1):41-50.
- 7- Zomorodian ZS, Tahsildoost M. Assessment of window performance in classrooms by long term spatial comfort metrics. *Energy Build*. 2017;134:80-93.
- 8- Al-Tamimi NM, Fadzil SFS, Harun WMW. The effects of orientation, ventilation, and varied WWR on the thermal performance of residential rooms in the tropics. *J Sustain Dev*. 2011;4(2):142-9.
- 9- Marino C, Nucara A, Pietrafesa M. Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? a parametric analysis in Italian climate conditions. *J Build Eng*. 2017;13:169-83.
- 10- Mangkuto RA, Rohmah M, Asri AD. Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: a case study of buildings in the tropics. *Appl Energy*. 2016;164:211-9.
- 11- Goia F, Haase M, Perino M. Optimizing the configuration of a façade module for office buildings by means of integrated thermal and lighting simulations in a total energy perspective. *Appl Energy*. 2013;108:515-27.
- 12- Mahdavinejad M, Mator S, Feyzmand N, Doroodgar A. Horizontal Distribution of Illuminance with Reference to Window Wall Ratio (WWR) in Office Buildings in Hot and Dry Climate, Case of Iran, Tehran. *Appl Mech Mater*. 2011;110-116:72-6.
- 13- Goia F. Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential. *Sol Energy*. 2016;132:467-92.
- 14- Yu W, Li B, Jia H, Zhang M, Wang D. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. *Energy Build*. 2015;88:135-43.