نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی ● دوره ۲۰ ● شماره ۲ ● تابستان ۱۳۹۴

پنجره‌ی هوا جریان*
عنصری کارآمد در کاهش مصرف انرژی ساختمان در شهر تهران

مریم محمدی[**1]، **شاهین حیدری**[2]
[1] کارشناس ارشد انرژی و معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
[2] استاد دانشکده‌ی معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
(تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۵/۲۹، تاریخ پذیرش نهایی: ۹۴/۲/۲)

چکیده

در چند دهه‌ی گذشته و مقارن با شروع بحران انرژی در جهان، تلاش‌ها در جهت کاهش مصرف انرژی در حوزه‌ی ساخت وساز، منجر به عایق‌کاری‌های وسیع پوسته در ساختمان‌های نوساز و قدیمی شد. عایق‌کاری به معنای جلوگیری از انتقال حرارت و نیز جلوگیری از نشت و نفوذ هوای سرد، متخصصان صنعت ساختمان را در سراسر جهان با چالش جدیدی در ارتباط با کیفیت هوای درون و چگونگی تأمین هوای تازه مواجه کرده است. این چالش، هنگامی که در کنار گرایش به استفاده از سطوح گسترده‌ی شیشه‌ای در ساختمان‌ها قرار گرفته است، منجر به ابداع نوع جدیدی از پنجره گردیده که تا حدی به مشکلات با شیوه‌ای نوین پاسخ می‌دهد. هدف مقاله‌ی حاضر، معرفی و امکان‌سنجی استفاده از این پنجره‌ی جدید به صورت بومی است. برای دست‌یابی به این هدف، به بررسی ساختاری پنجره با استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری و انجام محاسبات عددی پرداخته شده‌است تا در پرتوی آن، به بهترین ساختار با عملکردی بهینه در اقلیم شهر تهران دست یابیم. نتایج پژوهش نشان‌دهنده‌ی توانایی بالای این پنجره در راستای افزایش بهره‌وری سطوح شیشه‌ای (کاهش مصرف انرژی در هر دو بخش انتقال حرارت و تهویه) در مقایسه با پنجره‌های چند جداره‌ی معمولی است.

واژه‌های کلیدی
پنجره‌ی هواجریان، تهویه، انتقال حرارت، کاهش مصرف انرژی، بازیافت حرارت، کنترل کیفیت هوای داخل.

*این مقاله برگرفته از پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی انرژی و معماری نگارنده‌ی اول است که با راهنمایی نگارنده دوم در دانشگاه تهران و تحت حمایت سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور به انجام رسیده است.
** تلفن: ۰۹۱۲۶۴۴۷۳۶۵ ، نمابر: ۸۹۷۸۴۰۶۲-۰۲۱ ، E-mail: mohammadi_m@ut.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اولیه‌ی شروع بحران انرژی در جهان، تمرکزها بر روی انتقال حرارت از پوسته‌ی ساختمان بود. مثال بارز این موضوع، آیین‌نامه‌های ساختمانی اولیه در کشورهای اروپایی[۱] و مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران است که به افزایش حداقل‌های عایق‌کاری پوسته و کاهش سطوح پنجره‌ی مجاز در ساختمان‌ها دستور می‌دهند. از آن زمان، قوانین سخت‌گیرانه‌ای در ارتباط با تقاضای انرژی در ساختمان‌ها به طور مرتب وضع می‌شوند. با پیشرفت فنآوری در تولید پنجره‌ها و به دنبال آن کاهش قابل توجه مشکلات انتقال حرارت در بازشوها، سخت‌گیری‌ها در این حوزه حذف و دست طراحان برای استفاده از سطوح شیشه‌ای گشاده‌تر خواهد شد. با این وجود، هنوز پنجره‌ها در بکارگیری پوشش‌های کم‌گسیل، دو جداره کردن، استفاده از تجهیزاتِ کاهش پل‌های حرارتی و افزایش هوابندی، نقش فعالی در اتلاف حرارت کلی ساختمان بازی می‌کنند.

به موازات اینکه مسئله‌ی انتقال حرارت بوسیله‌ی عایق‌کاری پوسته‌ی ساختمان‌ها کنترل می‌شود، مسئله‌ی دیگر، یعنی اتلاف انرژی به دلیل تهویه، به عنوان عامل تاثیرگذار ثانویه اهمیت خود را بیش‌تر نشان می‌دهد. این موضوع توجه‌ها را به مسئله‌ی هوابندی عاقلانه‌ی ساختمان و کنترل جریان هوا - و نه حذف آن- معطوف می‌کند. زیرا از طرفی تلاش‌ها در راستای کاهش میزان تهویه (تعویض هوای کنترل نشده) و حذف مصرف انرژی در این بخش است و از طرف دیگر، تهویه بخشی از نیاز ساختمان و ساکنین بوده و تأمین آن اجتناب ناپذیر است(محمدی، ۱۳۹۱، ۵۵). در فصل سرد، تأمین هوای تازه از بیرون و انتقال مستقیم آن به داخل ساختمان، موجب ایجاد سوز و عدم آسایش می‌شود. بنابراین هوای تازه باید پیش از ورود به محیط داخل، پیش‌گرم شود. برای تهیه‌ی هوای تازه، در ساختمان‌های نوساز و مدرن امروز، می‌توان از سیستم‌های مکانیکی تعویض هوا مجهز به واحدهای بازیافت حرارت استفاده کرد، اما در ساختمان‌های موجود و به خصوص آپارتمان‌ها که به واسطه‌ی نوسازی به عایق‌کاری مجهز می‌شوند، نصب چنین تجهیزاتی، بسیار گران و گاهی غیر ممکن است(Taminskas and Domarkas, 2011,7). در ایران نیز اساساً چنین سامانه‌هایی وجود ندارند.[۲] بنابراین در بسیاری از موارد، تنها یک سامانه‌ی خروج هوا (اگزوز فن) نصب شده، و به این ترتیب باعث افزایش مصرف انرژی برای رساندن دمای هوای ورودی به دمای داخل ساختمان می‌شود(Appelfeld and Svendsen, 2011).

در شرایط استاندارد، پنجره و تهویه دو سامانه‌ی جدا از هم هستند، در بهترین حالت آن هم در اروپا، منافذ کوچکی[۳] در پروفیل پنجره‌ها پیش‌بینی می‌شوند که اجازه‌ی ورود مستقیم هوای سرد را به داخل فراهم می‌آورند. به عبارت دیگر، تمامی تدابیر اتخاذ شده برای جلوگیری از نفوذ باد و جریان هوای سرد را از بین می‌برند. با این شرایط ارائه راهکار ضروری است. راهکاری برای اینکه پنجره هم امکان ورود هوا را فراهم کند و هم نکند. راه‌حل متبادر، استفاده از نوعی پنجره‌ی هواجریان[۴] است. ایده‌ای که به صورت همه‌جانبه، به مشکلات «تهویه» و «انتقال حرارت» به عنوان چالش‌های اصلی و «آسایش حرارتی» و «کاهش صوت» به عنوان چالش‌های فرعی‌تر در پوسته‌های نورگذر توجه می‌کند.

۱- پنجره‌ی هواجریان

«پنجره‌های هواجریان، پنجره و سامانه‌ی تهویه را به وسیله‌ی کشاندن مسیر ورود هوای تازه از فاصله‌ی بین شیشه‌ها - قبل از ورود به فضای اتاق- با هم تلفیق می‌کنند. واژه‌ی «پنجره‌ی هواجریان» یا «پنجره‌ی دولایه‌ی تهویه شونده» برای معرفی پنجره‌های چندجداره‌ای استفاده می‌شود که یک یا بیشتر از یکی از فضاهای خالی بین شیشه‌ها، تهویه می‌شوند» (Raffnsoe, 2007, 1).

«وابسته به مسیر حرکت هوا، چهار حالت مختلف برای این سیستم به وجود می‌آید:

۱. پنجره‌ی دمنده‌ی هوا[۵] یا پنجره‌ی تأمین کننده‌ی هوا،
۲. پنجره‌ی مکنده‌ی هوا یا پنجره‌ی خارج کننده‌ی هوا،
۳. پنجره با پرده‌ی هوای داخلی و
۴. پنجره با پرده‌ی هوای خارجی[۶]»(Gosselin and Chen, 2008).

پنجره‌ی دمنده‌ی هوا، از سه لایه شیشه تشکیل شده‌است: یک واحد متشکل از دو شیشه با لایه‌ی هوایی محبوس مثل پنجره‌ی دوجداره، به همراه یک لایه‌ی سوم شیشه که از بیرون به آن اضافه شده‌است. بر خلاف شیشه‌های چندجداره‌ی مرسوم، فاصله‌ی هوایی بین واحد دوجداره و شیشه‌ی سوم محبوس نیست. یک منفذ ورود هوا در انتهای پنجره‌ی بیرونی و منفذ دیگر در بالای واحد دوجداره‌ی داخلی وجود دارد. هوای تازه از دریچه‌ی پایینی وارد شده[۷] و قبل از ورود به اتاق از فاصله‌ی هوایی تعبیه شده بالارفته و سپس وارد ساختمان می‌شود. در طول دوره گرمایش، هوای سرد بیرون هنگام عبور از فضای بین دو پنجره، گرمایی که بوسیله‌ی شیشه از داخل به بیرون هدایت می‌شود و نیز گرمای حاصل از تابش را دریافت کرده و به داخل اتاق باز می‌گرداند. به‌این‌ترتیب، هوای تازه‌ی در حال ورود به اتاق، ضمن جلوگیری از هدررفت گرمای شیشه، خود نیز پیش‌گرم شده و از انرژی مورد نیاز برای گرمایش این هوای تازه کاسته می‌شود. در نتیجه بار کل گرمایشی ساختمان کاهش می‌یابد. هوای تازه، زمانی از طریق این واحد پنجره‌ای وارد فضای اتاق می‌شود که منفذی برای خروج از اتاق (مکشی

طبیعی یا مکانیکی از داخل به خارج ساختمان) وجود داشته باشد. مانند چند فن، در فضاهای خیس ساختمان.

استراتژی این پنجره‌ها، بخشی از ابتکارات در زمینه‌ی هوشمندسازی عناصر ساختمانی و ساختارهای دوپوسته است که در اواخر قرن ۱۹ میلادی دراروپا، به صورت ابتدایی مورد مطالعه قرار گرفتند[۸]. طبق مطالعاتی که تاکنون انجام گرفته است، استفاده از این پنجره در حیطه‌ی ساختمان‌های اقامتی کوچک توجیه دارد. چرا که تأمین هوای تازه به وسیله‌ی این پنجره، دارای محدودیت‌هایی است که به عملکرد حرارتی بهینه‌ی پنجره بازمی‌گردد. از این رو، حداکثر توانایی پنجره برای تأمین هوای تازه در محدوده‌ی نرخ تعویض هوا برای ساختمان‌های مسکونی و اقامتی کم مساحت - همچون آپارتمان‌ها، خوابگاه‌های دانشجویی و اتاق‌های اقامتی هتل‌ها - قرار می‌گیرد.

۲- عوامل تأثیرگذار بر عملکرد پنجره

عوامل بسیاری بر عملکرد حرارتی پنجره‌ی دمنده‌ی هوا مؤثرند که آنها را می‌توان در دو بخش ساختاری و اقلیمی دسته‌بندی کرد. مهم‌ترین عوامل در بخش اول عبارتند از:

- سرعت جریان هوا،
- پوشش لایه‌ی کم‌گسیل بر روی شیشه،
- ضخامت شیشه‌ها،
- ارتفاع پنجره و
- عمق فضای تهویه‌شونده.

درحالی که در بخش دوم، «میزان دریافت تابش خورشید بر سطح پنجره» مهم‌ترین عاملی است که عملکرد حرارتی این پنجره را در اقلیم‌های مختلف تحت‌الشعاع قرار می‌دهد (McE-voy et al., 2003).

۳- روش پژوهش

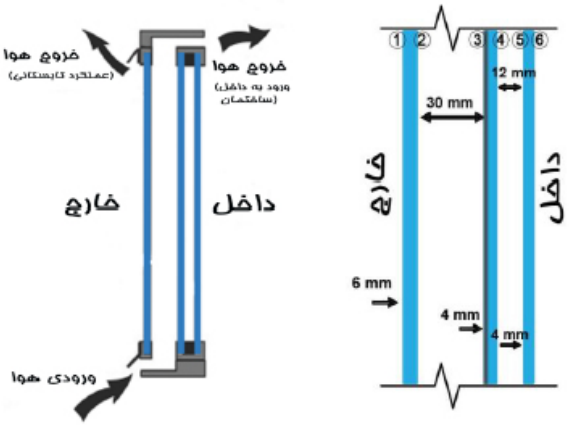
عملکرد حرارتی پنجره‌های هوا جریان در شرایط مختلف آب و هوایی و تغییر عوامل ذکرشده‌ی مؤثر بر آن، متغیر است و بررسی آن درنهایت بدون درنظرگرفتن نوع سامانه تهویه مورد استفاده در ساختمان ممکن نیست، زیرا پنجره قادر به تأمین کل نیاز گرمایشی هوای ورودی در شرایط متغیر آب و هوایی نیست. تفاوت اصلی پنجره‌ی معمولی و پنجره‌ی دمنده‌ی هوا، بر مقدار جریان حرارت همرفت، در فضای تهویه‌شونده‌ی مرتبط با آن است. بنابراین، دستیابی به ویژگی‌های حرارتی صحیح پنجره، گام نخست برای محاسبات بار مصرفی فضای مجاور آن برای شهر تهران است. پارامتر اصلی و اولیه‌ی مورد نیاز برای این منظور، میزان توانایی پنجره در پیش‌گرمایش هوای سرد بیرونی در هنگام عبور از فضای تهویه‌شونده‌ی میانی، با توجه به میزان دریافت تابش و بدون آن - در طول شبانه روز - است. معادلات مورد استفاده در تعدادی از نرم‌افزارهای موجود مانند انرژی‌پلاس یا دیزاین بیلدر، نواقصی در زمینه‌ی تعیین پارامترهای اصلی دارند، که صحت نتایج را با مشکل مواجه می‌کنند. صحیح‌ترین پاسخ در این زمینه، از نرم‌افزاری به نام «WIS» دریافت می‌شود. بنابراین به منظور رسیدن به ویژگی‌های حرارتی پنجره‌ی دمنده‌ی هوا، از شبیه‌سازی آن در این نرم‌افزار استفاده می‌شود." WIS 3.1 یک نرم‌افزار یکنواخت و چندمنظوره بر اساس استانداردهای اروپایی است که برای تعیین ویژگی‌های حرارتی و خورشیدی سیستم‌های مختلف پنجره‌ای طراحی شده و شامل یک منبع اطلاعاتی است که خصوصیات اجزای مختلف پنجره و تمام اطلاعات لازم برای محاسبات برهم‌کنش‌های حرارتی و نوری در آن درج شده است"(Van Dijk and Oversloot, 2003)." از خصوصیت‌های منحصر به فرد این نرم‌افزار، فراهم کردن امکان گردش هوا به صورت طبیعی یا اجباری بین آنها است. این قابلیت، نرم‌افزار را برای محاسبات عملکرد حرارتی و خورشیدی سیستم‌های پنجره‌ای پیشرفته و پیچیده و نماهای فعال مناسب می‌گرداند. الگوریتم‌های مورد استفاده در این نرم‌افزار بر اساس استانداردهای بین‌المللی «ایزو» و «سی ای ان[۹]» است. با این حال، نرم‌افزار برای بعضی از اجزا و شرایطی که این استانداردها پاسخگوی آنها نمی‌باشند، از معادلات پیشرفته‌ی دیگری نیز استفاده می‌کند" (Fuliotto, 2008, 66). علی‌رغم نتایج بسیار دقیق این نرم افزار، ضعف آن در عدم توانایی برای محاسبات در یک دوره‌ی زمانی و داشتن اطلاعات آب‌وهوایی به صورت پایه است(Perino and Aschehoug, 2009, 29). بنابراین برای دریافت اطلاعات حرارتی و نوری پنجره‌ی دمنده‌ی هوا، اطلاعات آب و هوایی شهر تهران را باید برای هر بار شبیه‌سازی به صورت دستی وارد نرم‌افزار کرد و از آنجا که شبیه‌سازی در وایز به صورت لحظه‌ای می‌باشد، ملزم به میانگین‌گیری و تکرار شبیه‌سازی در ساعات مختلف، برای انجام محاسبات در طول یک شبانه‌روز هستیم.

پارامترهای خروجی که از محاسبات صورت گرفته در این نرم‌افزار، به طور مستقیم دریافت می‌شوند عبارتند از: دمای هوا در خروجی پنجره (میزان پیش‌گرمایش هوای ورودی به داخل ساختمان) و در وسط شیشه، ضرایب انتقال حرارت همرفت و تابش سیستم پنجره به داخل و خارج، دمای سطوح مختلف شیشه.

برای دستیابی به پنجره‌ای با بهترین ساختار، پنج پیکربندی مختلف برای پنجره‌ی هواجریان، جهت بررسی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار انتخاب شدند. این انتخاب براساس نتایج مطالعات پیشین در کشورها و اقلیم‌های مختلف انجام شد تا حالت‌هایی که به نتایج بهتر نزدیک‌ترند مورد توجه قرار گیرد و از تکرار جلوگیری به عمل آید. بر این اساس، تعدادی از پارامترها شامل؛ عمق فضای تهویه‌شونده، دبی جریان هوای عبوری از پنجره، ضخامت شیشه‌ها و هندسه‌ی پنجره (پنجره‌هایی به عرض ۱متر و ارتفاع۱٫۵متر) در ابتدای کار ثابت فرض شدند. تنها خصوصیت شیشه‌ها - محل پوشش لایه‌ی کم‌گسیل- که مؤثرترین پارامتر در تغییر قابلیت‌های پنجره و میزان دریافت حرارت خورشیدی است، متغیر در نظر گرفته شد تا مناسب‌ترین حالت به دست آید. ساختار تعریف شده برای پیکربندی‌ها در جدول ۱ و شکل شماتیک پنجره و قرارگیری پوشش لایه‌ی کم‌گسیل در یکی از پیکربندی‌ها (به عنوان نمونه) درتصویر۱، قابل مشاهده است.

جدول ۱- ساختار پیکربندی‌های مختلف – (CU) به‌معنای پوشش لایه‌ی کم‌گسیل ازطرف خارج و (UC) از طرف داخل است.

ساختار پنجره	پیکربندی ۱	پیکربندی ۲	پیکربندی ۳	پیکربندی ۴	پیکربندی۵
شیشه خارجی	۶ میلی‌متر شفاف	۶ میلی‌متر شفاف	۶ میلی‌متر شفاف	۶ میلی‌متر شفاف	۶ میلی‌متر شفاف
عمق فضای تهویه‌شونده	۳۰ میلی‌متر	۳۰ میلی‌متر	۳۰ میلی‌متر	۳۰ میلی‌متر	۳۰ میلی‌متر
شیشه ی میانی	۴ میلی‌متر شفاف	۴ میلی‌متر کم‌گسیل(CU)	۴ میلی‌متر کم‌گسیل (UC)	۴ میلی‌متر شفاف	۴ میلی‌متر کم‌گسیل(CU)
فاصله‌ی هوابندی‌شده	۱۲میلی‌متر آرگون	۱۲میلی‌متر آرگون	۱۲میلی‌متر آرگون	۱۲میلی‌متر آرگون	۱۲میلی‌متر آرگون
شیشه‌ی داخلی	۴میلی‌متر شفاف	۴میلی‌متر شفاف	۴میلی‌متر شفاف	۴میلی‌متر کم‌گسیل(CU)	۴میلی‌متر کم‌گسیل(CU)
دبی جریان هوا(l/s)	۴	۴	۴	۴	۴



تصویر۱- سمت چپ : شکل شماتیک پنجره‌ی دمنده‌ی هوا و سمت راست: پیکربندی شماره ۲ با پوشش لایه‌ی کم‌گسیل روی سطح ۳ (از خارج).

برای دستیابی به ویژگی‌های حرارتی اولیه‌ی هریک از پیکربندی‌ها در شرایط مختلف آب و هوایی درطول یک شبانه‌روز، شبیه‌سازی به‌صورت میانگین ساعتی و برای ۲۴ ساعت از یکی از سردترین روزهای زمستان در تهران (۵ دی ماه) تکرار شده است.

۴- انجام محاسبات برپایه‌ی استاندارد ایزو

پارامترهای حرارتی اولیه مورد نیاز مستخرج از نرم‌افزار، برای انجام محاسبات تکمیلی، در معادلات موجود در استاندارد ایزو وارد شده‌اند. این محاسبات در دو بخش انجام گرفته است:

- محاسبات تعادل انرژی و تبادل حرارت برای پنجره (به عنوان یک سیستم مستقل) و
- محاسبات تعادل انرژی و تبادل حرارت بین پنجره‌ی هواجریان و اتاق مجاورآن(Erhorn, 2007, 28).

به این ترتیب، مقدار عددی جریان‌های اصلی انرژی که برای شناسایی جزء به جزء قابلیت هریک از پیکربندی‌ها مورد نیاز است، به دست آمده‌اند.

منظور از اتاق، فضایی به مساحت ۱۰ مترمربع با ارتفاع ۲/۸ متر می‌باشد که با توجه به دبی عبوری ۴ لیتر بر ثانیه‌ای از پنجره‌ها، طبق آیین‌نامه، تعویض هوای مورد نیاز برای فضاهای مسکونی (نیم بار در ساعت) تأمین خواهد شد. دمای هوای داخل اتاق‌ها، ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد درنظر گرفته شده است، در حالی‌که دمای هوای محیط خارج (در روز پنجم دی‌ماه شهر تهران) از صفر تا ۷ درجه در طول شبانه‌روز متغیر است.

۵- انتخاب بهترین پیکربندی

انجام مقایسه بر روی پیکربندی‌ها، از ۴ دیدگاه مختلف صورت گرفته است:

۵-۱- مقایسه‌ی بار مصرفی اتاق مفروض با پیکربندی‌های مختلف.

برای انجام این مقایسه، از رابطه‌ی زیر استفاده شده است:

$$Q = Q_{gl,trans,ext} + Q_{gl,vent} - Q_{gl,sol,direct}$$

- $Q_{gl,trans,ext}$ ، هدررفت نهایی حرارت از سیستم پنجره به وسیله‌ی هدررفت از سطح شیشه‌ی خارجی پنجره
- $Q_{gl,vent}$ ، بارمصرفی نهایی تحمیل شده به ساختمان ناشی از تهویه، پس از پیش گرمایش اولیه‌ی هوا در پنجره و
- $Q_{gl,sol,direc}$ ، بخشی از حرارت خورشیدی دریافتی که در نهایت منجر به گرمایش فضای داخل است.

انتخاب این رابطه بر مبنای درنظر گرفتن سه عامل اصلی زیر در تعیین قابلیت پنجره است:

- میزان توانایی پنجره در پیش گرمایش اولیه‌ی هوا
- قابلیت پنجره درعبورو انتقال حرارت خورشیدی به فضای داخل
- قابلیت پنجره در نگهداشت انرژی و جلوگیری از انتقال آن به محیط خارج

طبق جدول۲، بار مصرفی نهایی اتاق با بهره‌گیری از پیکربندی شماره‌ی ۵، کمترین مقدار و درصورت استفاده از پیکربندی شماره‌ی یک که از هیچ لایه‌ی کم‌گسیلی بر روی شیشه‌های آن استفاده نشده است، از بیشترین مقدار (ضعیف‌ترین حالت ممکن) برخوردار خواهد شد. از طرفی تفاوت مصرف انرژی دو پیکربندی ۲ و ۵ ، بسیار ناچیز است. این تفاوت اندک، به دلیل برخورداری پیکربندی ۵ از یک لایه‌ی اضافی پوشش کم‌گسیل بر روی سطح ۵ است.

بنابراین، هرچند استفاده از شیشه‌ی کم‌گسیل، تفاوت

بسیاری را در کاهش مصرف کل ایجاد می‌کند، اضافه کردن پوشش دوم، تأثیر چشمگیری در ارتقای عملکرد حرارتی پنجره ندارد. آنچه که مهم است محل قرارگیری این پوشش و جهت آن است. به عنوان مثال، پیکربندی ۲ و ۳ هر دو از لایه‌ی پوشش کم‌گسیل روی سطح ۳ برخوردارند، با این حال، پنجره‌ی شماره‌ی ۲ بسیار موفق‌تر عمل می‌کند، زیرا پوشش کم‌گسیلی که روی سطح سوم پیکربندی شماره‌ی ۲ قرار داده شده است، منجر به ایجاد شیشه ای با ضریب نشر پایین‌تری به طرف خارج (گسیل حرارت بیشتر به طرف داخل) گردیده است و این حالت برای پیکربندی ۳ برعکس است.

۵-۲- میانگین دمای هوا در خروجی پنجره برای پیکربندی‌های مختلف

دمای هوا در خروجی پنجره (ورود به فضای داخل) در ۲۴ ساعت مختلف از شبانه روزِ پنجم دی ماه تهران در پیکربندی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نکته‌ی قابل توجه؛ قابلیت بیشتر بعضی از پیکربندی‌ها برای گرمایش هوای عبوری در ساعات اوج تابش، علی‌رغم توانایی کمتر در شب (زمانی که هوا تنها به وسیله‌ی به دام انداختن حرارت انتقالی از محیط داخل به فضای واسط گرم می‌شود) است. این تفاوت عملکرد بین دو پیکربندی شماره‌ی ۲ و ۵ در نمودار ۱ قابل مشاهده است.

آنچه که اهمیت دارد، قابلیت کلی سیستم در گرمایش هوا در طول کل یک شبانه روز زمستانی است؛ به این معنی که هوای ورودی (نشت‌شده به فضای داخل) از تفاوت دمایی کمتری با دمای مطلوب داخلی برخوردار بوده و درنتیجه به تأمین شرایط آسایشی مورد انتظار نزدیک‌تر باشد. این مقدار به صورت میانگین ۲۴ ساعتی در جدول ۳ نشان داده شده است. براساس نتایج، پیکربندی شماره ی ۲ ، از میانگین بالاتر و عملکرد مناسب‌تری در این خصوص، برخوردار است.

۵-۳- بار مصرفی ناشی از تهویه در طول کل شبانه‌روز

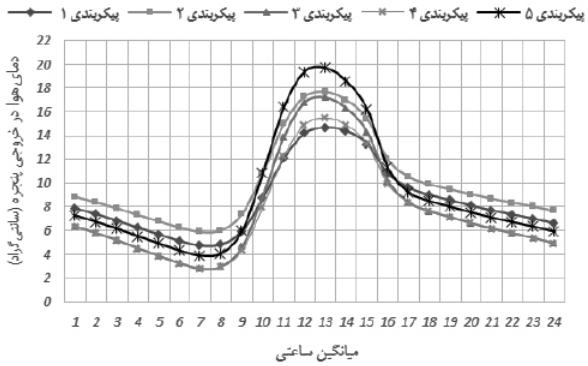
هنگامی‌که هوا با عبور از سیستم پنجره، از میانگین دمای بالاتری برخوردار شود، آن‌گاه انرژی مصرفی ناشی از تهویه که برای رساندن دمای هوای پیش‌گرم شده به دمای مطلوب محیط داخل، به سامانه تهویه‌ی ساختمان تحمیل می‌شود کاهش می‌یابد. این مقدار در جدول ۲ آورده شده است ($Q_{gl,vent}$، که درمورد پیکربندی شماره ۲ از کمترین مقدار برخوردار است). علاوه بر آن، توانایی بالاتر از یک پیکربندی در پیش‌گرمایش هوای ورودی در ساعات سرد شب، آسایش حرارتی بیشتری را (با کاهش مشکل نشت هوای سرد) فراهم می‌کند، که این قابلیت در پنجره‌ی شماره‌ی ۲ با ۴،۵ درجه پیش‌گرمایش هوا در سردترین ساعت، از بهترین حالت ممکن برخوردار است.

۵-۴- بهره‌وری بازیافت حرارت

برای دستیابی به میزان بهره‌وری هر پنجره از رابطه‌ی زیر استفاده شده است:

جدول۲- مجموع ۲۴ ساعته‌ی هدررفت‌ها و دریافت‌های حرارتی و بار مصرفی نهایی پیکربندی‌های مختلف برای روز پنجم دی‌ماه (وات‌ساعت).

شماره‌ی پیکربندی	۱	۲	۳	۴	۵
$Q_{gl,trans,ext}$	۸۱۷	۳۶۴	۴۴۷	۴۴۵	۲۰۷
$Q_{gl,vent}$	۱۳۱۹	۱۱۳۶	۱۳۹۶	۱۴۵۶	۱۲۵۵
$Q_{gl,sol,direc}$	۳۹۷	۴۴۵	۲۹۸	۴۷۲	۴۷۲
Q_{total}	۱۷۴۰	۱۰۵۴	۱۵۴۵	۱۴۲۹	۹۹۰



نمودار۱- دمای هوا در خروجی پنجره در ساعات مختلف شبانه روز ۵ دی‌ماه، با سرعت ۴ لیتر بر ثانیه.

جدول۳- میانگین دمای هوا و بهره‌وری بازیافت حرارت برای پیکربندی‌های مختلف.

شماره‌ی پیکربندی	۱	۲	۳	۴	۵
میانگین ۲۴ساعتی دمای هوای خروجی از پنجره	۸،۶۲	۱۰،۰۷	۷،۸۸	۷،۴۹	۹،۲۰
بهره‌وری بازیافت حرارت	٪۲۹،۴	**٪۳۸،۹**	٪۲۵،۳	٪۲۲،۶	٪۳۳،۹

$$\mu_t = (t_{ext} - t_{out} / t_{ind} - t_{out}) . 100\%$$

t_{ext} دمای هوا در خروجی پنجره (ورود به اتاق) پس از پیش‌گرمایش اولیه ($^{\circ}c$)؛

t_{out} دمای هوای خارج ($^{\circ}c$) و

t_{ind} دمای هوای داخل است ($^{\circ}c$).

بازیافت حرارت در پنجره‌ی هواجریان، تابع دو عامل «مقدار تابش» و «میزان حرارت انتقالی از داخل به خارج (که توسط هوا به دام انداخته‌شده و بازگردانده می‌شود)» می‌باشد. بنابراین در ساعات میانی روز که تابش در حداکثر مقدار خود است، بهره‌وری پنجره به دلیل پیش‌گرمایش بیشتر هوای عبوری از فضای واسط افزایش می‌یابد. این مقدار در ساعت ۱۲تا۱۳ بعد از ظهر روز پنجم دی‌ماه، درصورتی که از پیکربندی ۵ استفاده شود، به ٪۹۷،۷۵ (با گرمایش ۱۳ درجه ای هوا) می‌رسد. بررسی نتایج حاصل از پیکربندی‌های مختلف نشان داد که حتی در زمانی که تابش خورشید وجود ندارد (شب هنگام) و در شرایطی که هدررفت حرارت از پنجره به بیش‌ترین حالت ممکن خود می‌رسد، هنوز هوای عبوری از فضای میانی، به واسطه‌ی دریافت حرارت از

سطح شیشه‌ی داخلی توسط همرفت و تابش حرارت از داخل، تا حدود ۲ درجه پیش‌گرم می‌شود (برای ضعیف ترین پیکربندی). واضح است که عملکرد بهینه‌ی پنجره نمی‌تواند فقط در طول روز (با همراهی تابش خورشیدی) و یا تنها در طول شب (با تکیه بر بازگرداندن حرارتِ درحال فرار از شیشه) بررسی شود. بنابراین، بهره‌وری بازیافت حرارت برای ۵ پیکربندی مختلف به صورت میانگین کل شبانه‌روز محاسبه و در جدول ۳ نشان داده شده است. طبق نتایج حاصله، پیکربندی ۲ از تعادل بهتری در گرمایش هوا برای روز و شب برخوردار است (۳۹٪ بازیافت حرارتی).

طبق نتایجی که ارائه شد، «**پیکربندی شماره‌ی ۲**» با داشتن یک لایه پوشش کم‌گسیل روی سطح ۳ و در تماس با هوای درحال تهویه، به دلیل ارائه‌ی بهترین شرایط دمایی، آسایشی و مصرف کمتر انرژی نهایی، به عنوان پیکربندی بهینه انتخاب گردید. در ادامه ذکر ۲ نکته ضروری است:

• در مورد میزان بار مصرفی، پیکربندی شماره‌ی ۵ از شرایط بهتری (با تفاوت بسیار اندک) برخوردار بود، اما این تفاوت اندک به بهای جایگزینی یک شیشه‌ی کم هزینه‌ی معمولی با شیشه‌ای با پوشش لایه‌ی کم‌گسیل و گران‌تر به دست خواهد آمد و از طرف دیگر وجود دو شیشه‌ی کم‌گسیل در پیکربندی پنجره، میزان دریافت نور روز را بیشتر کاهش داده و مصرف انرژی برای سامانه‌ی روشنایی را افزایش خواهد داد.

قرارگرفتن پوشش لایه‌ی کم‌گسیل روی سطح ۳، به معنای قرارگرفتن این پوشش در معرض عبور هوا و در تماس دائمی با آن است. در چنین حالتی می‌بایست از پوشش‌های کم‌گسیل با خصوصیات مقاومتی بالاتری[10] (ضدخش بودن) نسبت به پوشش‌هایی که در لایه‌های هوابندی شده قرار می‌گیرند، برخوردار باشد.

۶- بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد حرارتی پیکربندی منتخب

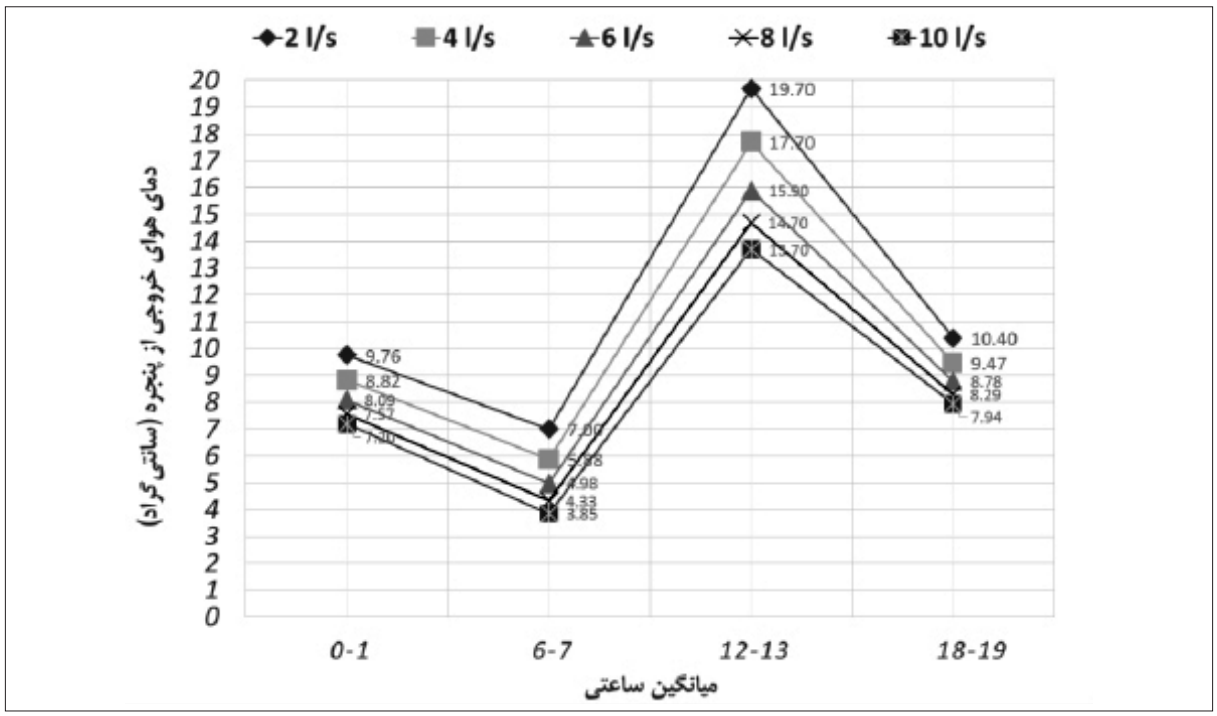
در شبیه‌سازی‌هایی که انجام شد، علاوه بر پوشش لایه‌ی کم‌گسیل، ۳ پارامتر دیگر شامل: دبی جریان هوای درحال تهویه از پنجره، هندسه‌ی پنجره و عمق فضای تهویه‌شونده، به صورت پیش‌فرض ثابت در نظر گرفته شدند تا امکان مقایسه به وجود آید. شبیه‌سازی‌ها بار دیگر برای پیکربندی شماره‌ی ۲ و با اعمال تغییراتی در پارامترهای ثابت اولیه تکرار شدند، تا تأثیر آنها بر عملکرد بهتر و بازدهی نهایی پنجره مغفول نماند. نتیجه‌ی نهایی به عنوان ثابتی برای محاسبه‌ی میزان بارمصرفی بر ساختمان مفروض در بخش بعد و مقایسه‌ی آن با پنجره‌های معمولی مورد استفاده قرار گرفته است.

۶-۱-تغییر سرعت جریان هوا

افزایش دبی هوای عبوری از سطح پنجره، فرصت تماس هوا با سطوح گرم شیشه (برای دریافت حرارت از طریق همرفت) و حضور در فضای گلخانه‌ای واسط، جهت جمع‌آوری هرچه بیشتر حرارت به دام افتاده ناشی از تابش خورشیدی را کم‌تر و قابلیت پنجره را در پیش‌گرمایش هوای ورودی به اتاق کمتر می‌کند.

نمودار۲، دمای هوا را در هنگام خروج از پنجره (ورود به اتاق)، با ۵ حجم جریان هوای متفاوت و برای ۴ ساعت مختلف از شبانه‌روزِ پنجم دی‌ماه نشان می‌دهد. در دبی‌های بالا، این تفاوت کاهش می‌یابد.

بهره‌وری بازیافت حرارت در جریان حجمی هوای بیش‌تر از ۸ l/s دیگر آن‌قدری نیست که سودآور باشد. از طرفی اعمال دبی تهویه‌ی بسیار پایین از پنجره نیز نمی‌تواند اتفاق بیفتد، چرا که



نمودار۲- دمای هوا در نقطه‌ی خروج از پنجره، در سرعت‌های مختلف، برای ۴ ساعت از شبانه روز ۵ دی‌ماه.

نرخ تهویه‌ی مورد نیاز را تأمین نکرده و مجبور به استفاده از سطح بیشتری از پنجره خواهیم بود که خود در مسئله‌ی اتلاف حرارت، مزید بر علت خواهد شد. بنابراین، دبی متوسط ۴ تا ۶ لیتر بر ثانیه برای تأمین هوای مورد نیاز در کنار برخورداری از بازدهی بالاتر، مناسب تشخیص داده شد.

۶-۲- تغییر ارتفاع پنجره

در مورد ابعاد پنجره، آنچه که درگرمایش هوای عبوری مؤثر واقع می‌شود، ارتفاع پنجره است. تمامی محاسبات نیز در استاندارد ایزو و نرم‌افزار وایز برای پنجره‌ای با عرض ۱ متر انجام می‌گیرند. جریان هوای عبوری با واحد «دسی‌مترمکعب بر ثانیه، به ازای هر متر»[11] است و تغییر عرض پنجره در میزان پیش‌گرمایش هوا تأثیری نخواهد داشت. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند، افزایش ارتفاع پنجره – با ثابت نگاه داشتن عرض- افزایش پیش‌گرمایش هوا را به دنبال دارد، اما از طرف دیگر، هدررفت حرارت از سطح شیشه‌ی خارجی را افزایش می‌دهد.

بنابراین برای مقایسه‌ی صحیح‌تر، پنجره‌هایی با عرض و ارتفاع متفاوت که درنهایت از مساحتی یکسان برخوردار باشند، بررسی شدند. مشخصات پنجره‌ها که همه دارای پیکربندی شماره‌ی ۲ هستند و نتایج بررسی در جدول ۴ آورده شده است.

ارتفاع ۱ متری پنجره‌ی اول، شرایط مطلوبی را ایجاد نمی‌کند و برای حصول شرایط بهینه‌ای که هم کم‌ترین هدررفت حرارتی را شامل شود و هم از ارتفاعی مقبول برای اکثر فضاها برخوردار باشد، بهتر است پنجره حداقل از ارتفاع ۱٫۵ متر برخوردار باشد. بنابراین ارتفاع بیشتر- در صورتی‌که مساحت نهایی پنجره با کاهش عرض ثابت نگاه داشته شود- نه تنها قابلیت پنجره را در پیش‌گرمایش هوا افزایش می‌دهد، انتقال حرارت نهایی را نیز از شیشه‌ی بیرونی (از طریق همرفت) کاهش داده و بهره‌وری کل افزایش می‌یابد. بیشترین بهره‌وری برای نماهایی خواهد بود که از پنجره هایی در حداکثر ارتفاع ممکن استفاده کنند. با این حال تولید پنجره‌هایی با ارتفاع ۲ متر و بیشتر، هم از نظر امنیتی (مقاومت شیشه) و هم از نظر فراوانی رایج نخواهد بود، ضمن اینکه بین ارتفاع ۱٫۵ و ۲ متر افزایش بهره‌وری شیشه چندان چشمگیر نیست، بنابراین ارتفاع ۱٫۵ متر، می‌تواند به عنوان ارتفاعی مقبول و ثابت در نظر گرفته شود.

۶-۳- تغییر عمق فضای تهویه‌شونده

برای درک از میزان تأثیری که تغییر عمق فضای واسط در عملکرد پنجره خواهد داشت، پیکربندی شماره‌ی ۲ با عمق فضای واسطِ متفاوت از ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر مورد بررسی مجدد قرار گرفت. با افزایش عمق، تغییراتی در ضریب انتقال حرارت همرفت مشاهده می‌شود. این تغییر در فاصله‌ی ۱۰تا۲۰ میلی‌متر زیاد و پس از آن بسیار ناچیز است. در این فاصله (۲۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر)، دمای سطوح داخلی و خارجی شیشه تغییر چندانی نکرده و شار نهایی همرفت از سطوح شیشه نیز تقریباً ثابت است. نتیجه آن‌که؛ در تعیین عمق بهینه، آرام بودن جریان هوا از بیشترین اهمیت برخوردار است. زیرا تلاطم و آشوب در مسیر جریان هوا، عاملی است که تبادل حرارت میان سطوح شیشه ای داخلی و خارجی را تسهیل کرده و پیش‌بینی صحیح نحوه‌ی انتقال حرارت، بخصوص همرفت حرارت را با نقص روبرو می‌کند. ازطرف دیگر، جریان آرام از انتقال حرارت – جز از طریق تابش- جلوگیری کرده، و می‌تواند حرارت منتقل شده از داخل به فضای واسط را به دام انداخته و به فضای داخل بازگرداند. عرض‌های کمتر، امکان ایجاد جریان‌های متلاطم را بیش‌تر از بین برده و بهره‌ی حرارتی بیشتری را برای پیش‌گرمایش هوای تهویه‌شونده متصورانند. با این حال، پیش‌بینی دقیق‌تر کیفیت جریان هوا از این منظر تنها توسط بررسی‌های آزمایشگاهی میسر است، برای نمونه نتایج آزمایشات در دانشگاه کمبریج عمق ۳۰ میلی‌متر را عمق مناسبی معرفی کرده است (Mcevoy et al., 2003) . در منابع دیگر ۵۰ میلی‌متر و حتی ۸۰ میلی‌متر نیز مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است (Raffnsøe, 2007, 23; Appelfeld and Svendsen, 2012). بنابراین تعیین مقدار بهینه‌ای برای این پارامتر را می‌توان در تلفیق با پارامترهای دیگر همچون نیاز به تعبیه‌ی سایه‌بان و سایر پارامترهای زیبایی شناسی و اقتصادی در ساخت و تولید پنجره، تعیین نمود.

۷- مقایسه‌ی بارمصرفی با پنجره‌ی دمنده‌ی هوا و پنجره‌ی دوجداره و سه‌جداره‌ی معمولی

برای داشتن تصوری جامع نسبت به موضوع، میزان هدررفت‌های حرارتی در بخش‌های مختلف (انتقال حرارت از شیشه و تهویه) درکنار دریافت‌های حرارتی (ناشی از تابش مستقیم خورشید)، که با داشتن پنجره‌های معمولی بر اتاق‌هایی مفروض اعمال می‌شوند محاسبه و با اتاق دیگری که مجهز به پنجره‌ی دمنده‌ی هوا است مقایسه شده است. مشخصات هر سه پنجره در جدول ۵ آورده شده است.

فرض بر این است که تهویه‌ی مورد نیاز اتاق‌هایی که مجهز

جدول۴- هدررفت حرارت نهایی (برای ساعت۱۲تا۱۳) از پنجره‌هایی با هندسهِ متفاوت.

مشخصات پنجره ها با ۴ هندسه‌ی مختلف				
شماره پنجره	عرض (متر)	ارتفاع (متر)	مساحت (مترمربع)	هدررفت حرارت ناشی از انتقال حرارت + تهویه
الف	۲	۱	۲	۵۱٫۸۶ وات ساعت
ب	۱٫۳۳	۱٫۵	۲	۲۹٫۹۱ وات ساعت
ج	۱	۲	۲	۲۴٫۶۲ وات ساعت
د	۰٫۸	۲٫۵	۲	۲۳٫۱۷ وات ساعت

به پنجره‌های معمولی دوجداره و سه‌جداره هستند، از شکافی که روی دیوار تعبیه شده است و به صورت مستقیم از خارج به داخل تأمین می‌شود. درحالی‌که تأمین هوای تازه‌ی مورد نیاز برای اتاق دیگر، برعهده‌ی پنجره‌ی دمنده‌ی هوا است. دبی تهویه ۴ لیتر بر ثانیه درنظر گرفته شده است تا مقایسه‌ها در امتداد بخش قبل و در یک راستا قرار گیرند. برای مشخص شدن تأثیر پنجره‌ها بر بار مصرفی اتاق، باید اتاق‌ها به صورت کامل عایق بندی و هوابندی شده در نظر گرفته شوند. به این ترتیب، از محاسبه‌ی اتلاف حرارت از طریق جدارها صرف‌نظر شده است.

بار حرارتی مصرفی به تفکیک و در هر یک از بخش های تهویه، انتقال حرارت از شیشه و دریافت مستقیم حرارت از خورشید برای اتاق، برای هر سه اتاق محاسبه و در جدول ۶ آورده شده است.

از مطالعه‌ی جدول، نتایج زیر حاصل می‌شود:

الف- انتقال حرارت اولیه از داخل به پنجره (ناشی از همرفت و تابش داخل به خارج) در اتاق شماره‌ی یک (مجهز به پنجره‌ی دمنده‌ی هوا) بیشتر از اتاق ۲ و ۳ است، اما هدررفت حرارتی که در نهایت از شیشه‌ی خارجی پنجره به محیط خارج اتفاق می‌افتد، بسیار کم‌تر از مقداری است که از پنجره‌های معمولی تلف می‌شود. این مقدار با توجه به جدول برای یک پنجره‌ی دمنده‌ی هوا ۴۴٪ کمتر از یک پنجره‌ی معمولی سه‌جداره و ۵۶٪ کمتر از یک پنجره‌ی معمولی دوجداره است، چرا که تا ۶۰٪ حرارتی که از پنجره درحال اتلاف بوده است توسط هوا جمع‌آوری و به داخل بازگردانده شده است (مقایسه‌ی هدررفت از شیشه‌ی داخلی و خارجی).

ب- وقتی از پنجره‌ی دمنده‌ی هوا برای پیش‌گرمایش هوای ورودی استفاده می‌شود، بارمصرفی ناشی از تهویه که برای رساندن دمای هوای سرد بیرون به دمای داخل، بر سامانه‌ی تأسیسات تحمیل خواهد شد ۳۹٪ کاهش می‌یابد.

ج- بهره‌ی گرمایشی فضای داخل ناشی از حرارت تابش مستقیم خورشید (بخشی که مستقیماً به حرارت تبدیل می‌شود) برای ساختار پنجره‌ی دو و سه‌جداره بیشتر است، زیرا مقدار زیادی از حرارت در پنجره‌ی هواجریان توسط هوای درحال عبور در فضای واسط دریافت و صرف پیش‌گرمایش آن می‌شود.

د- بار مصرفی کل اتاق، شامل هدررفت‌های حرارتی منهای دریافت حرارتی خورشیدی، برای اتاق شماره‌ی یک ۵۴٪ اتاق شماره‌ی دو و ۵۰٪ اتاق شماره‌ی سه است. به عبارت دیگر؛ با بهره‌گیری از پنجره‌ی هواجریان، ۴۶٪ صرفه جویی نهایی در مصرف انرژی نسبت به پنجره‌ی سه‌جداره و ۵۰٪ کاهش مصرف انرژی نسبت به پنجره‌ی دوجداره‌ی معمولی حاصل خواهد شد.

نتایج پژوهش حاضر، تأییدکننده‌ی فرض اولیه مبنی بر اثربخشی بیشتر این پنجره در اقلیم تهران نسبت به اقلیم‌های بررسی شده‌ی پیشین در مقالات است. به عنوان مثال، دمای هوایی که در فضای واسط حرکت می‌کند، در تحقیقاتی که در مرکز تحقیقات ساختمان کانادا انجام شده است، نهایتاً تا ۵۰درصد تفاوت دمایی داخل و خارج عنوان شده است (Bara-kat,1987)، درحالی که این مقدار برای اقلیم تهران ۶۳٪ به دست آمده است. هم‌چنین مصرف انرژی اتاقک مورد آزمایشِ مجهز به پنجره‌ی دمنده‌ی هوا در این تحقیق، ۲۰ ٪ کمتر نسبت به واحد مجهز به پنجره‌ی سه‌جداره و ۲۵ ٪ کمتر نسبت به پنجره‌ی دوجداره عنوان شده است که در مقایسه با نتایج پژوهش حاضر برای اقلیم تهران، بسیار پایین‌تر است.

۸- محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت مؤثر

اصلی‌ترین پارامتری که مقایسه‌ی آسان بین پنجره‌های هواجریان و پنجره‌های معمولی را میسر می‌کند، ضریب انتقال حرارت مؤثر[۱۲] است(Mcevoy et al., 2003; Appelfeld and Svendsen, 2011). این ضریب درواقع به ازای میزان انتقال حرارت از شیشه‌ی خارجی پنجره و با داشتن اختلاف دمای

جدول۶- مجموع روزانه‌ی بارحرارتی مصرفی در هر بخش برای هر سه پنجره بر حسب وات ساعت.

نوع پنجره	دمنده‌ی هوا	سه‌جداره	دوجداره
هدررفت حرارت از شیشه‌ی داخلی	۸۸۹	۶۳۹	۸۱۱
هدررفت نهایی از شیشه‌ی خارجی	۳۶۴	۶۳۹	۸۱۱
هدررفت ناشی از تهویه	۳۶۴	۱۸۴۴	۱۸۴۴
دریافت حرارتی اتاق ناشی از تابش مستقیم خورشید	۴۴۵	۵۳۷	۵۶۹
بار مصرفی کل (وات‌ساعت)	۱۰۵۴	۱۹۴۸	۲۰۸۷

جدول۵- مشخصات پنجره‌ی معمولی و هواجریانِ بررسی شده - پنجره‌ها به عرض یک متر و ارتفاع ۱,۵ متر می‌باشند. (CU) به معنی پوشش لایه‌ی کم‌گسیل برروی سمت خارجی شیشه است.

ساختار پنجره	اتاق(۱): مجهز به پنجره‌ی دمنده‌ی هوا	اتاق (۲): مجهز به پنجره سه‌جداره و ورودی هوا	اتاق (۳): مجهز به پنجره دوجداره و ورودی هوا
شیشه‌ی خارجی	۶ میل شفاف	۶ میل شفاف	۴ میل شفاف
عمق فضای تهویه‌شونده/ هوابندی	۳۰ میل	۱۲ میل آرگون	-
شیشه ی میانی	۴میل کم‌گسیل(CU)	۴میل کم‌گسیل(CU)	-
فاصله‌ی هوابندی‌شده	۱۲میل آرگون	۱۲میل آرگون	۱۲میل آرگون
شیشه‌ی داخلی	۴ میل شفاف	۴ میل شفاف	۴میل کم‌گسیل(CU)
دبی جریان هوا(l/s)	۴ / از هر متر عرض پنجره	۴ / از شکاف مفروض روی دیوار	۴ / از شکاف مفروض روی دیوار

داخل و خارج، برای هر مترمربع از پنجره تعریف می شود.

پس از به دست آوردن بار حرارتی که ناشی از انتقال حرارت از شیشه‌ی خارجی به بیرون است، می‌توان این ضریب را به دست آورده و به عنوان شاخصی برای عملکرد پنجره معرفی نمود. از آنجا که از این ضریب برای قیاس عملکرد حرارتی پنجره‌های هواجریان و معمولی استفاده می‌شود، بنابراین باید آن را برای شرایط بدون تابش و فارغ از تأثیر اقلیم به دست آورد. زیرا ضرایب انتقال حرارتی که برای پنجره‌های معمولی معرفی می‌شوند، برای تمام شرایط اقلیمی ثابت هستند. در چنین حالتی این ضریب به صورت «ضریب انتقال حرارت مؤثر تاریک»[۱۳] نامیده می‌شود.

نهایتاً این مقدار برای پنجره‌ی هواجریان (با پیکربندی بهینه) $[W/m^2K]$ ۰/۶۳، برای پنجره‌ی سه‌جداره $[W/m^2K]$ ۱/۱۱ ، و برای پنجره‌ی دوجداره $[W/m^2K]$[۱۴] ۱/۴۲ به دست آمد. به عبارت دیگر، در صورت جایگزینی پنجره‌های هواجریان با بهترین پنجره‌های چندجداره‌ی موجود، ضریب انتقال حرارت تا ۵۷٪ کاهش می‌یابد.

۹- عملکرد پنجره در طول دوره‌ی سرمایش

برای برخورداری از کارایی بهینه در فصل تابستان، یک پنجره‌ی هوا جریان در حالت «دمنده ی هوا» را می توان به راحتی به یک پنجره‌ی هوا جریان در حالت «پرده‌ی هوایی خارجی» تبدیل کرد. برای این کار باید مسیر جریان هوا به وسیله‌ی بسته‌شدن دریچه‌ی پنجره‌ی داخلی و باز شدن دریچه‌ای در بالای پنجره‌ی خارجی (توسط شیرهای دستی یا اتوماتیک) به بیرون هدایت شود (تصویر۱). بدین ترتیب، هوای موجود بین دو شیشه، دائماً توسط تابش گرم شده، به‌طرف بالا حرکت می‌کند و در مسیر خروج از پنجره، حرارت دریافتی اضافی را نیز با خود به بیرون فضای واسط منتقل کرده و از انتقال آن از طریق شیشه‌ی داخلی به فضای داخل جلوگیری می‌کند. تعبیه‌ی سایه‌بان در فضای واسط نیز از دریافت مستقیم حرارت خورشیدی می‌کاهد، که در این مورد باید به جنس و رنگ کرکره دقت شود تا با گرم‌شدن بیش از حد، خود عاملی برای انتقال حرارت توسط تابش به داخل نگردد. آنچه که مسلم است اثربخش بودن این حالت نیز در کاهش انتقال حرارت ناشی از تابش خورشید در روزهای گرم از بیرون به داخل ساختمان، با مقایسه‌ی نمونه‌های انجام‌شده‌ی خارجی است. با این حال میزان اثربخشی آن برای اقلیم تهران نیز باید بررسی شود تا سودمندی نهایی پنجره، برای عملکرد دوگانه‌ی سرمایشی و گرمایشی مشخص گردد.

نتیجه

روند کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها، نباید به هر قیمتی همچون از دست دادن کیفیت هوای خوب در داخل ساختمان به دست آید. هوابندی کامل عناصر مختلف ساختمانی به بهانه‌ی کاهش انتقال حرارت عاقلانه نبوده و لازم است تلاش‌ها در این زمینه به سمت کنترل جریان هوا سوق داده شود و نه حذف آن. برای ادامه‌ی صحیح این روند، نیازمند نوآوری‌هایی در این زمینه هستیم.

در این مقاله، «اتلاف حرارت گسترده از سطوح شیشه‌ای» و «لزوم کنترل تعویض هوا در ساختمان‌هایی که به میزان استانداردی عایق شده‌اند»، به عنوان دو چالش اصلی معرفی و استفاده از پنجره‌ی هواجریان به عنوان راه‌حلی مناسب و روشی فعال در کاهش مصرف انرژی ساختمان معرفی گردید. پس از آن روشی برای محاسبه و بررسی عملکرد حرارتی این پنجره در زمستان ارائه گردیده و تلاش شد تا با استفاده از آن به ساختاری بهینه برای این نوع پنجره (از میان پنج ساختار ممکن معرفی‌شده) در اقلیم شهر تهران دست یابیم. بررسی‌ها نشان دادند در صورتی که پنجره از یک لایه پوشش کم‌گسیل بر روی سطح سه (با مشخصاتی که در متن مقاله توضیح داده شد) برخوردار باشد، بهترین شرایط دمایی و آسایشی را تأمین کرده و در نهایت با کمترین میزان مصرف انرژی، بهترین عملکرد را خواهد داشت.

سپس، تأثیر تجهیز ساختمان به این نوع پنجره، از طریق کاربرد آن در یک اتاقک مفروض و مقایسه‌ی نتایج بار مصرفی حاصل با شرایطی که اتاقک با پنجره‌های معمولی، تجهیز شده باشد صورت گرفت. نتایج نشان‌دهنده‌ی توانایی بالای این نوع پنجره در راستای افزایش بهره‌وری سطوح شیشه‌ای (کاهش انتقال حرارت و افزایش آسایش حرارتی) و کاهش مصرف انرژی در بخش تهویه است، به طوری که با بهره‌گیری از پنجره‌ی دمنده‌ی هوا، ۴۶٪ صرفه جویی نهایی در مصرف انرژی نسبت به پنجره‌ی سه‌جداره و ۵۰٪ کاهش مصرف انرژی نسبت به پنجره‌ی دوجداره‌ی معمولی حاصل خواهد شد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از راهنمایی‌های دکتر بهروز کاری و دکتر ریما فیاض تشکر و قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

۱ رافنسوا، ۲۰۰۷.

۲ این سیستم در کشورهایی مثل آلمان در خانه های مسکونی نوساز مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما از آن‌جا که به تجهیزات مکانیکی خاصی نیازمند هستند، از فراوانی و مقبولیت زیادی برخوردار نشده‌اند.

3 Trickle Vent.

4 Double Ventilated Windows / Air Flow Windows.

۵ پنجره‌ی هواجریان در این حالت موضوع پژوهش حاضر است. از بررسی الباقی صرف نظر می‌شود.

6 1- Supply Air Window, 2- Exhaust Air Window, 3- Indoor Air Curtain , 4- Outdoor Air Curtain.

۷ برای جلوگیری از انتقال غبار و آلودگی توسط هوای تازه به فضای داخلی پنجره و ساختمان، تعبیه‌ی فیلتر در شکاف ورودی هوا در پنجره‌ی خارجی ضروری است. نمونه‌های ساخته شده‌ی خارجی در کشورهای فنلاند، دانمارک و انگلستان از چنین فیلترهایی برخوردار هستند. با توجه به پیشرفت علمی کشور در زمینه‌ی فن‌آوری نانو، می‌توان این فیلترها را با کیفیت بالا و هزینه‌ی مناسبی در داخل تولید و در روند ساخت پنجره به خدمت درآورد. همچنین می‌بایست پنجره‌ی خارجی قابلیت بازشدن آسان و جداشدن از پنجره‌ی داخلی را دارا باشد تا بتواند به راحتی مورد نظافت قرار گیرد.

۸ در بعضی متون، اصل و تفکر اولیه‌ای که این سیستم از آن نشأت گرفته است را به ۳۰۰ سال پیش در شرق و مشخصاً در کشور روسیه برمی‌گردانند؛ جایی که سرمای شدید مانع از بازشدن پنجره‌ها برای استفاده از تهویه در زمستان می‌شد، قراردادن دو پنجره پشت سرهم در ساختمان و تعبیه‌ی دو دریچه‌ی کوچک، یکی در پایین پنجره‌ی بیرونی و دیگری در بالای پنجره‌ی داخلی، هوای مورد نیاز برای تهویه را با دمایی بالاتر از دمای هوای بیرون تأمین می‌کرد. این ساختار دو پنجره‌ای در روسیه به «فورتوچکا» معروف بود. نقل قولی نیز تجدید تفکر این ساختار را به معمار مشهور فنلاندی؛ آلوار آلتو در دهه‌ی ۱۹۲۰ نسبت می‌دهد. آلتو از پنجره‌هایی دولایه که تأمین کننده‌ی هوا بودند در ساختمانی در فنلاند استفاده کرد. در سال‌های اخیر در فنلاند بیش از ۲۰ هزار عدد از این پنجره‌ها به فروش رفته و چندین کارخانه در اروپا به ساخت آنها مبادرت ورزیده‌اند.

9 CEN and ISO Standards.

10 Hard Coating.

11 [dm3/s.m].

12 Effective U-Value.

13 Dark U-Value.

۱۴ . ضریب انتقال حرارت برای پنجره‌های دوجداره‌ی کنونی در ایران بین ۲ تا ۳، $w/m^2.k$ است و مقایسه‌ها در پژوهش حاضر برای بهترین نوع پنجره‌های چندجداره ممکن صورت گرفته است.

فهرست منابع

محمدی مریم (۱۳۹۱)، *امکان‌سنجی استفاده از پنجره‌های دولایه‌ی تهویه شونده و بررسی تأثیر آن بر عملکرد حرارتی ساختمان‌های مسکونی*، رساله کارشناسی ارشد انرژی و معماری، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Appelfeld, David; Svendsen, Svend (2011), Experimental analysis of energy performance of a ventilated window for heat recovery under controlled conditions, *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 3200–3207.

Barakat, S.A (1987), Thermal Performance of a Supply-Air Window, *12 Annual Passive Solar Conference*, July 12-16, 1987, Canada, Vol. 12, pp.152-158.

Erhorn, Hans (2007), *BESTFAÇADE, Best Practice for Double Skin Façades, WP 4 Report "Simple calculation method*, Technical report, Fraunhofer-Institute for Building Physics (IBP), Stuttgart, Germany.

Fuliotto, Roberto (2008), *Experimental and Numerical Analysis of Heat Transfer and Airflow on an Interactive Building Façade*, PhD Thesis, University of Cagliari, Italy.

Gosselin, J.R; Chen, Q (2008), A Dual Airflow Window for Indoor Air Quality Improvement and Energy Conservation in Buildings, *HVAC&R Research*, 14(3), pp. 359-372.

McEvoy, M.E; Southall, R.G; Baker, P.H (2003), *Test cell evaluation of supply air windows to characterise their optimum performance and its verification by the use of modelling techniques*, *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 1009-1020.

Perino, Marco; Aschehoug, Øyvind (2009), Expert Guide, Part 2, *Responsive Building Elements*, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, International Energy Agency.

Raffnsøe, Lau Markussen (2007), *Thermal Performance of Air Flow Windows*, Master Thesis, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.

Taminskas, Jonas; Domarkas, Giedrius (2011), *Ventilation window with solar shading/night blind*, Master Program in Indoor Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Aalborg Universitet, Denmark.

Van Dijk, H.A.L; Oversloot H.P (2003), WIS, *the European Tool to Calculate Thermal and Solar Properties of Windows and Window Components*, Proceedings of Building Simulation, Eighth International IBPSA Conference, August 11-14, 2003, Netherlands, pp.259-266.

WinDat, Window Information System software (WIS), 2004–2006, http://www.windat.org/wis/html/index.html.

http://www.biffvernon.freeserve.co.uk/air_flow_windows.htm
http://www.constructireland.ie.

http://www.hansengroup.biz/hansen3g/index , PDF file.