



Effect of Using Different Gases in Multi-glazed Windows to Reduce Building Heat Losses

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Bagheri-Esfe H.^{*1} PhD,
Shahriar M.¹ BS

How to cite this article

Bagheri-Esfe H, Shahriar M. Effect of Using Different Gases in Multi-glazed Windows to Reduce Building Heat Losses. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(6):1409-1416.

ABSTRACT

One of the main concerns of the world today is reduction of energy resources and rising prices. To counter this, most countries in the world are looking for new solutions to reduce the need for energy in various fields. Energy consumption in buildings has a significant share of the annual energy consumption of countries. About 40% of energy consumption of Iran is annually consumed in heating, cooling, and other building needs. Therefore, this sector has a significant potential for improving infrastructure and reducing energy consumption. One of the building components that plays a significant role in the loss of thermal energy is window. Using multi-glazed windows filled with ideal gases, a lot of wasteful energy in the building can be reduced. In this paper, the effect of using different multi-glazed windows to reduce building heat losses has been investigated. Effect of number of layers, kind of ideal gas and its thickness, and also kind of frame has been studied in this paper. To investigate these factors, thermal losses of a typical building is simulated in the Carrier software. Also, conduction heat flux passing through multi-glazed windows for different filling gases is calculated by Fluent software. Based on the results, three-glazed window with Krypton gas has the best performance in reducing heat loss of the building and its application improves thermal performance of a single-pane window up to 66%.

Keywords Window of Building; Multi-glazed; Filling Gas; Heat Loss

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Shahreza, Shahreza, Isfahan, Iran

*Correspondence

Address: University of Shahreza, Imam Khomeini Boulevard, Shahreza, Isfahan, Iran. 8614956841
Phone: +98 (31) 53238379
Fax: +98 (31) 53245010
h.bagheri@shahreza.ac.ir

Article History

Received: November 22, 2018
Accepted: December 23, 2018
ePublished: June 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Determination of optimum thickness of double-glazed windows for the ... [2] The use of ultrasound for investigation ... [3] Specifications of double-glazed ... [4] A generalized window energy rating system for typical ... [5] Evaluation of window energy rating models for different ... [6] Using results from field surveys to predict the effect of open windows ... [7] Climatic, parametric and non-parametric analysis of ... [8] Determination of optimum air-layer thickness ... [9] Flow and heat transfer in double, triple ... [10] Modelling and simulation of a ventilated ... [11] Thermal characteristics of water-flow ... [12] A CFD study of convection in a double glazed window ... [13] Thermal convection in double glazed windows ... [14] Free convective heat transfer in an enclosure with an ... [15] Nodal network and CFD simulation of airflow ... [16] Energy and environmental impact analysis ... [17] A numerical model to evaluate the thermal ... [18] Glazing systems with silica aerogel for ... [19] Experimental performance evaluation of aerogel ... [20] Thermal performance of a room with a double glazing ... [21] Calculations of building ... [22] Design of air-conditioning systems using ...

تاثیر استفاده از گازهای مختلف در پنجره‌های چندجداره به‌منظور کاهش تلفات حرارتی ساختمان

حامد باقری اسفه * PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، مرکز آموزش عالی شهرضا، شهرضا، اصفهان، ایران

مصطفی شهریار BS

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، مرکز آموزش عالی شهرضا، شهرضا، اصفهان، ایران

چکیده

یکی از دغدغه‌های اصلی جهان امروز، کاهش منابع انرژی و افزایش قیمت آن است. برای مقابله با این مساله اکثر کشورهای جهان به‌دنبال راه‌حل‌های جدید برای کم کردن نیاز به انرژی در زمینه‌های مختلف هستند. مصرف انرژی در ساختمان‌ها سهم قابل توجهی از مصرف انرژی سالیانه کشورها را به خود اختصاص می‌دهد. سالانه حدود ۴۰٪ مصرف انرژی ایران صرف گرمایش، سرمایش و سایر نیازهای ساختمان‌ها می‌شود. لذا این بخش پتانسیل قابل توجهی برای اصلاح زیرساخت‌ها و کاهش مصرف انرژی را داراست. یکی از اجزای سازنده ساختمان‌ها که نقش قابل توجهی در هدررفت انرژی حرارتی دارد، پنجره است. با استفاده از پنجره‌های چندجداره پرشده با گازهای بی‌اثر می‌توان بخش زیادی از انرژی اتلافی ساختمان را کاهش داد. در این مقاله تاثیر استفاده از پنجره‌های چندجداره مختلف در کاهش تلفات حرارتی ساختمان بررسی شده است. تاثیر تعداد جداره شیشه در پنجره، نوع گاز بی‌اثر و ضخامت آن و همچنین نوع قاب در این مقاله مطالعه شده است. برای بررسی این عوامل، تلفات حرارتی یک ساختمان نمونه در نرم‌افزار Carrier شبیه‌سازی و محاسبه شده است. همچنین میزان شار هدایتی عبوری از پنجره‌های چندجداره با گازهای پرکننده مختلف به کمک نرم‌افزار FLUENT محاسبه شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، پنجره سه‌جداره پرشده با گاز کریپتون بهترین عملکرد را در کاهش تلفات حرارتی ساختمان دارد و به‌کارگیری آن ۶۶٪ عملکرد حرارتی پنجره تک‌جداره را بهبود می‌بخشد.

کلیدواژه‌ها: پنجره ساختمان، چندجداره، گاز پرکننده، اتلاف حرارت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۲

* نویسنده مسئول: h.bagheri@shahreza.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه افزایش چشمگیر قیمت انرژی موجب شده است تا دانشمندان و مهندسان سرتاسر جهان به‌دنبال روش‌هایی برای کاهش مصرف انرژی در زمینه‌های مختلف باشند. یکی از این زمینه‌ها صنعت ساختمان است که سهم عمده‌ای در مصرف انرژی دارد. بخش ساختمان با سهمی حدود ۴۰٪ کل مصرف انرژی ایران، بیشترین سهم مصرف انرژی در کشور را به خود اختصاص داده است. لذا انجام اقدامات و پروژه‌های بهینه‌سازی مصرف سوخت در این بخش حایز اهمیت و ضروری است.

مطالعات نشان می‌دهد که حدود یک‌سوم کل تلفات گرما در ساختمان‌ها از طریق پنجره‌ها اتفاق می‌افتد که مقدار بسیار بالایی است. اتلاف انرژی از یک ساختمان معمولی ۴۰٪ از طریق دیوارهای خارجی، ۳۰٪ از طریق پنجره‌ها، ۱۷٪ از طریق درب‌ها، ۷٪ از طریق سقف و ۶٪ از کف ساختمان صورت می‌گیرد^[۱]. پنجره‌ها و شیشه‌ها بخش بسیار مهمی در اتلاف انرژی ساختمان به شمار می‌روند. بنابراین استفاده از پنجره‌هایی که کمترین اتلاف انرژی را داشته باشند، می‌تواند کمک بزرگی در راستای مصرف بهینه انرژی باشد.

امروزه استفاده از پنجره‌های دوجداره در ساختمان‌ها بسیار رایج شده است. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد در بریتانیا تقریباً ۹۳٪ خانه‌ها از پنجره‌های چندجداره استفاده می‌کنند، در حالی که این رقم در سال ۱۹۷۰ میلادی کمتر از ۱۰٪ بوده است.

۱-۱- تاریخچه استفاده از پنجره‌های چندجداره

در سال ۱۸۴۰ میلادی در اسکاتلند، سرمای شدید زمستان، زندگی را در خانه‌های بزرگ دشوار ساخته بود. گرم کردن خانه‌هایی که اتاق‌های زیادی داشتند مشکل بود و هرچه خانه‌ها بزرگ‌تر بودند، دمای داخلی پایین‌تری داشتند. این مشکلات باعث شد تا اسکاتلندی‌ها به‌دنبال راه‌حلی برای گرم نگه‌داشتن خانه‌هایشان بگردند که موجب شد طرحی به‌نام دوجداره را توسعه دهند. در سال ۱۹۳۰ میلادی در ایالات متحده مخترعی به‌نام هاوون باعث رشد فناوری دوجداره شد و ترموپان را اختراع کرد. ترموپان در سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۵۰ میلادی محبوبیت زیادی کسب کرد و به‌عنوان یک محصول لوکس و تجملاتی در آن دوره ایالات متحده ظهور پیدا کرد. در سال ۱۸۸۰ میلادی در انگلستان، هزاران خانه جدید شروع به توسعه کردند که شامل برج‌ها و سایر ساختمان‌هایی بود که از لحاظ عایق‌کاری ضعیف بودند. عموم مردم انگلستان در آن زمان برای گرم‌ترماندن خانه‌هایشان تلاش می‌کردند. در آن زمان، پنجره‌های تک‌جداره و قدیمی با وجود اینکه جلوی بادهای سرد را می‌گرفتند، اما دیگر جواب‌گوی انتظارات مردم نبودند. در سال ۱۹۶۵ میلادی، همه‌چیز شروع به تغییر کرد. دولت بریتانیا تصمیم گرفت تا ساخت خانه‌های آینده را مدیریت کند و قوانین جدیدی را برای محافظت از مردم ساکن در آن خانه‌ها تنظیم کند. قوانین جدید توسط سازمان ساختمان‌سازی، تایید و مورد حمایت قرار گرفت. تشویق سرمایه‌گذاران و سازندگان برای سرمایه‌گذاری در تکنولوژی‌های جدید و استفاده از موادی که باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شوند، یکی از قوانینی بود که برای کاهش هزینه‌ها معرفی شد. اگرچه خانه‌ها در ایالات متحده از دهه ۱۹۴۰ میلادی از مزایای شیشه‌های دوجداره برخوردار بودند، اما تا سال ۱۹۷۰ میلادی در انگلستان به‌دلیل هزینه‌های بالا و عدم وجود قوانین جدید ساخت‌وساز، هنوز استفاده از این شیشه‌ها به‌طورکامل رواج پیدا نکرده بود.

با ورود مواد ارزان‌تر، محبوبیت شیشه‌های دوجداره در بریتانیا بیشتر شد. همچنین انگلستان به‌دلیل بحران انرژی و وابستگی به تامین‌کنندگان خارجی باید در برنامه عرضه نفت خود تجدید نظر می‌کرد که باعث شد تا با جدیت بیشتری به سمت استفاده از تکنولوژی‌های جدید برای کاهش مصرف انرژی حرکت کند. بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ میلادی، استفاده از شیشه دوجداره در خانه‌ها از ۱۶٪ تا بیشتر از ۶۰٪ افزایش یافت.

اکنون صنعت پنجره دوجداره قسمتی از روند بهبودبخش خانگی است. پنجره‌های دوجداره به‌خاطر توانایی در کاهش سروصدا، گرمایش خانه و استفاده هوشمندانه از انرژی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. شرکت‌ها و افراد در بریتانیا هر ساله حدود سه‌میلیارد پوند برای انواع تاسیسات پنجره دوجداره، از پنجره‌های معمولی گرفته تا مصارف بزرگ حفاظتی، سرمایه‌گذاری می‌کنند.

همان‌طور که ملاحظه شد، تاریخچه پنجره دوجداره یک روند طولانی ولی بسیار جالب دارد. بدون شک با تاکید بیشتر بر زندگی پاک و پایدار، می‌توانیم در آینده‌ای نزدیک انتظار پیشرفت‌های بیشتری در زمینه پنجره‌های چندجداره داشته باشیم.

در سالیان اخیر، اصلاح ضریب انتقال حرارت پنجره‌ها با استفاده از پنجره‌های چندجداره و استفاده از گازهای آرگون (Ar) و کریپتون

ساختمان به شمار می‌روند. همچنین شیشه‌های سه‌جداره و چهارجداره نیز می‌توانند در پنجره‌های ساختمان مورد استفاده قرار گیرند، اما از لحاظ قیمت تمام‌شده، شیشه‌های سه‌جداره نسبت به شیشه‌های دوجداره، افزایش قیمتی حدود ۱/۸ برابر دارند.

علاوه بر ویژگی‌های بالا، شیشه‌ها باید دارای یک لایه منعکس‌کننده باشند تا بتوانند اشعه مادون قرمز و فرابنفش خورشید را منعکس نموده و از آسیب دیدن لوازم داخل ساختمان و افراد در برابر تابش نور خورشید جلوگیری نمایند و در عین حال چشم‌انداز ساختمان را محدود نکنند. همچنین در کنار ویژگی‌های عایق حرارتی، یک پنجره خوب باید عایق صوتی مناسبی نیز باشد تا بتواند از محیط داخل ساختمان در برابر آلودگی‌های صوتی خارجی محافظت نماید. پنجره‌های چندجداره علاوه بر نقشی که در جلوگیری از تلفات انرژی دارند، عایق مناسبی در برابر آلودگی‌های صوتی به شمار می‌آیند.

۴-۱- گازهای گوناگون در پنجره‌های چندجداره

ویژگی انواع مختلف گازهای مورد استفاده در پنجره‌های چندجداره در جدول ۱ به‌صورت خلاصه آورده شده است. استفاده از گاز آرگون در پنجره‌های دوجداره دارای مزایای بسیار زیادی است. گاز آرگون گازی نجیب است. بدین معنی که با هیچ ماده‌ای ترکیب شیمیایی انجام نمی‌دهد. گاز آرگون، گازی بدون بو، بی‌مزه و غیرآتش‌زا است. گاز آرگون علاوه بر کاهش رسانایی گرمایی بین دو شیشه پنجره دوجداره، با کمتر کردن مقدار جریان همرفتی در فضای دو شیشه از اتلاف گرمایی بیشتر جلوگیری می‌کند. زیرا ضریب انتقال حرارت گازهای خنثی و سنگین‌تر از هوا، پایین‌تر است. علاوه بر این، تهیه گاز آرگون آسان و ارزان است. بنابراین می‌توان به‌صورت گسترده و صنعتی از آن استفاده کرد.

جدول (۱) مشخصات گازهای مختلف مورد استفاده در پنجره‌های چندجداره

نوع گاز	قیمت مناسب	عایق حرارتی قوی	عایق صوتی قوی	دسترسی آسان	توضیحات
هوا	*			*	
آرگون	*	*		*	پراستفاده‌ترین گاز در پنجره‌ها
کریپتون		*	*		عملکرد حرارتی مناسب در فاصله‌های کم و قیمت بسیار بالا
هگزافلورا یدوگرید			*		بهترین عایق صوتی، عملکرد حرارتی ضعیف و تولید ترکیبات سمی
دی‌اکسید کربن	*		*	*	عملکرد حرارتی ضعیف

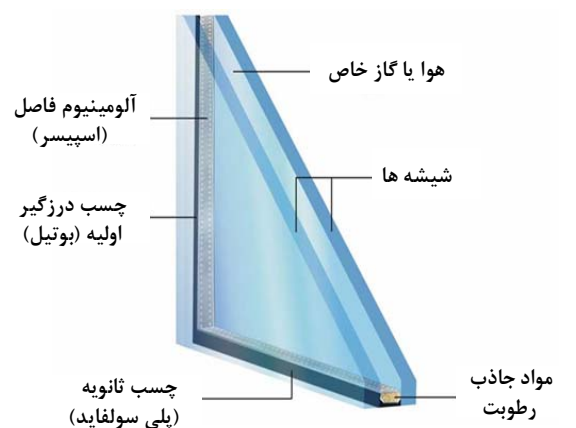
به‌صورت یک قانون عمومی، غلظت گاز درون پنجره دوجداره باید بیش از ۹۰٪ باشد. این غلظت در طول زمان کم می‌شود. مقدار کم‌شدن این غلظت سالانه چیزی حدود ۰/۵ تا ۱٪ است. کیفیت پنجره دوجداره‌ای که از آرگون پر شده باشد تا زمانی که غلظت گاز آرگون به ۷۵٪ نرسد، تغییری نخواهد کرد. بنابراین پنجره دوجداره‌ای که به‌صورت استاندارد با گاز آرگون پر شده باشد، حداقل ۲۰ سال رسانایی مطلوب خواهد داشت.

گاز هگزافلورایدیوگرید (SF₆) گازی بی‌رنگ، بی‌بو، غیرقابل اشتعال و عایق صوتی قوی است. خاصیت خنک‌کنندگی و انتقال حرارت گاز هگزافلوراید نسبت به اکسیژن سه‌برابر بوده و در ضمن ترکیبات حاصل از آن بسیار سمی است. از همین رو تنها در موقعیت‌های خاص مانند فرودگاه‌ها استفاده می‌شود، زیرا در صورتی که تنفس

(Kr) به‌عنوان گاز پُرکننده بین شیشه‌های چندجداره امکان‌پذیر شده است. اخیراً در اکثر کشورها بیشتر از آرگون به‌عنوان گاز پُرکننده استفاده می‌شود، در حالی که در اروپای غربی استفاده از گازهای نجیب سنگین کریپتون و زنون (Xe) نیز امکان‌پذیر شده است [2].

۲-۱- اجزای تشکیل‌دهنده پنجره‌های دوجداره

همان‌طور که در شکل ۱ [3] نشان داده شده، سیستم پنجره دوجداره شامل دو لایه شیشه است که به‌طور موازی و در فواصل مساوی از یکدیگر قرار گرفته‌اند و توسط اسپیسر در دور تا دور آنها، از هم جدا شده‌اند. فضای بین شیشه‌ها را عموماً از طریق ایجاد خلأ یا با تزریق گازهای بی‌اثری همچون آرگون پر می‌کنند. در شیشه‌های دوجداره غالباً از اسپیسرهای آلومینیومی استفاده می‌شود که آن را با ماده رطوبت‌گیر پر می‌کنند و این ماده موجب جذب رطوبت هوای مابین دو شیشه می‌شود. سپس توسط مواد درزگیر مناسب، کاملاً آب‌بندی می‌شود.



شکل (۱) ساختار پنجره دوجداره [3]

۳-۱- مشخصات یک پنجره مناسب

دو عامل مهم در کاهش مصرف انرژی و افزایش بازده انرژی در ساختمان‌ها، جلوگیری از عبور هوا از درزها و منافذ و کاهش انتقال حرارت از طریق جداره‌های ساختمان است. بیشترین تلفات حرارتی در ساختمان از طریق پنجره‌ها صورت می‌گیرد که شامل نشت هوا و انتقال حرارت رسانشی است. بنابراین استفاده از پنجره‌های نامناسب می‌تواند باعث افزایش مصرف انرژی و افزایش هزینه‌های ناشی از آن شود.

پنجره‌های مناسب از لحاظ تلفات حرارتی، پنجره‌هایی هستند که کمترین میزان نشت هوا و رسانش گرمایی را داشته باشند. همچنین این پنجره‌ها باید ضمن بهره‌مندی از یک فریم عایق و با استحکام بالا، حداقل دارای شیشه‌های دوجداره باشند و جذب گرمای حاصل از تابش نور خورشید را نیز کاهش دهند. استفاده از شیشه‌های تک‌جداره در پنجره‌ها به‌دلیل داشتن ضریب رسانش گرمایی بالا باعث اتلاف حرارت زیاد از طریق رسانش گرمایی می‌شود که در تابستان موجب انتقال گرمای فضای بیرون به فضای داخل ساختمان می‌شود و در زمستان نیز گرمای مفید داخل ساختمان را به بیرون انتقال می‌دهد. بنابراین برای داشتن یک پنجره خوب باید از شیشه‌هایی استفاده نمود که کمترین مقدار رسانش گرما را داشته باشند. شیشه‌های دوجداره حدوداً دارای نیمی از مقدار رسانش گرمایی شیشه‌های تک‌جداره هستند و باعث کاهش چشمگیر هدررفت انرژی از طریق رسانش در پنجره‌های ساختمان می‌شوند و مورد مناسبی برای استفاده در پنجره‌های

شود باعث خفگی می شود و کشنده است.

گاز کریپتون نیز گازی بوده که برای استفاده در شیشه های چندجداره مناسب است. با توجه به اینکه کریپتون در فاصله های کوچک (کمتر از ۸ میلی متر) بهتر عمل می کند، بیشتر در پنجره های سه جداره و چهارجداره استفاده می شود. کریپتون حدود ۲۰۰ برابر از آرگون گران تر است، بنابراین استفاده از آن در پنجره های دوجداره معمولی دارای صرفه اقتصادی نیست.

۱-۵- مطالعات انجام شده در زمینه پنجره های چندجداره

در بسیاری از مطالعات انجام شده، عملکرد پنجره ها با در نظر گرفتن یک جعبه ساده برای پنجره یا خانه بررسی شده است [4-6]. اما تبدلات حرارتی بین نواحی مختلف یک خانه و نقش پنجره ها در تلفات حرارتی نمی تواند با یک جعبه ساده شبیه سازی شود. بنی هاشمی و همکاران [7]، تأثیر استفاده از پنجره دوجداره در کاهش تلفات حرارتی ساختمان در شرایط مختلف آب و هوایی در چهار شهر مختلف ایران (رشت، اردبیل، یزد و بندرعباس) را بررسی کردند. براساس نتایج آنها اگرچه استفاده از پنجره های دوجداره در شرایط مختلف در کاهش تلفات حرارتی ساختمان مفید بوده، اما تأثیر استفاده از این پنجره ها در آب و هوای گرم و مرطوب در مقایسه با بقیه شرایط آب و هوایی بیشتر است.

آیدین [8] ضخامت بهینه لایه هوا در پنجره های دوجداره را برای چهار شهر مختلف ترکیه بررسی کرد. طبق محاسبات او با انتخاب ضخامت بهینه هوا، میزان اتلاف انرژی ساختمان به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. آرسی و همکاران [9] جریان و انتقال حرارت در پنجره های دوجداره، سه جداره و چهارجداره را به روش عددی بررسی کردند. آنها از نرم افزار تجاری FLUENT برای حل معادلات حاکم بر جریان استفاده کردند. از روش سیمپل برای کوپل سرعت و فشار و همچنین از گسسته سازی مرتبه دوم برای معادلات مومنتوم و انرژی استفاده کردند. طبق محاسبات آنها با تعویض پنجره های دوجداره با پنجره های سه یا چهارجداره بین ۵۰ تا ۶۷٪ اتلاف حرارتی پنجره ها در همه شهرهای ترکیه کاهش می یابد. براساس نتایج آنها، پارامترهای مهم در انتقال حرارت از پنجره ها به ترتیب تعداد جداره ها، ضریب صدور سطح شیشه و فاصله بین جداره ها است.

کارلوس و همکاران در سال ۲۰۱۱ [10]، تأثیر استفاده از پنجره های دوتایی تهویه شده را در کاهش بار حرارتی ساختمان به روش عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. در این نوع پنجره ها هوای تازه مورد نیاز برای اتاق، با عبور از فضای بین دو پنجره موازی، پیش گرم و سپس وارد اتاق می شود. در این مقاله تأثیر اختلاف دمای فضای بیرون و داخل اتاق، تأثیر تشعشع خورشید و همچنین تأثیر تغییر پنجره داخلی به دوجداره روی انرژی تزریق شده به اتاق بررسی شد. پس از آن چو و همکاران [11] نوع جدیدی از پنجره دوجداره با جریان آب بین جداره ها را پیشنهاد کردند. طبق نظر آنها، آب عبوری از فضای بین جداره ها با گرفتن حرارت عبوری از پنجره باعث کاهش تلفات حرارتی آن می شود و در ضمن، آب پیش گرم شده قابلیت استفاده در ساختمان را دارد. طبق محاسبات آنها استفاده از این پنجره ها در مناطق آب و هوایی معتدل و گرم مناسب است.

دلال و همکاران [12] تأثیر استفاده از یک صفحه چین خورده بین شیشه های یک پنجره دوجداره در اعداد رایلی مختلف را به روش عددی بررسی کردند. آنها از نرم افزار تجاری FLUENT برای شبیه سازی جابه جایی آزاد در پنجره های چندجداره استفاده کردند. براساس نتایج آنها، استفاده از این صفحه منجر به کاهش جابه جایی آزاد بین دو شیشه مخصوصاً در اعداد رایلی بزرگ

می شود. پس از آن دی گیورگی و همکاران [13]، تأثیر استفاده از فین با ساختارهای مختلف در فضای بین دو شیشه در پنجره دوجداره برای کاهش نرخ انتقال حرارت را به روش عددی بررسی کردند. آنها به حل سه بعدی معادلات جریان و انتقال حرارت داخل پنجره دوجداره با استفاده از نرم افزار FLUENT پرداختند. براساس نتایج آنها تعبیه فین های افقی داخل پنجره های دوجداره منجر به کاهش ۳۰ درصدی نرخ انتقال حرارت داخل پنجره ها در اعداد رایلی بالا می شود.

اودیسیس و نیلر [14] جابه جایی آزاد در پنجره دوجداره با وجود صفحات منحنی شکل در فضای بین دو شیشه را به کمک نرم افزار FLUENT شبیه سازی کردند. آنها تأثیر عدد رایلی، نسبت ابعاد محفظه و هندسه صفحات را روی انتقال حرارت جابه جایی بررسی نمودند. روش عددی آنها بر مبنای الگوریتم سیمپل و تقریب مرتبه دوم برای جملات جابه جایی بود. نتیجه مطالعه آنها تولید یک ضریب اصلاح برای عدد ناسلت متوسط جریان بود.

پس از آن هنبی و همکاران [15]، میدان جریان و انتقال حرارت در یک نمای دوجداره ساختمان شامل لایه شیشه خارجی، پرده و لایه دوجداره داخلی را به روش عددی و به کمک نرم افزار CFX شبیه سازی کردند. آنها مکانیزم های انتقال حرارت هدایت، جابه جایی آزاد و تشعشع را در شبیه سازی خود در نظر گرفته و نتایج کار خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند.

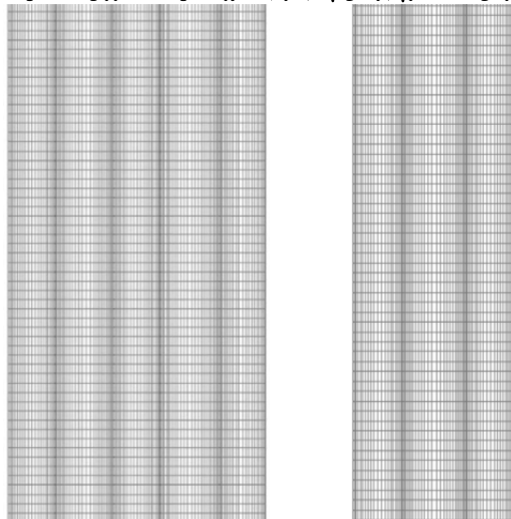
ویبر و مونیر [16] انرژی مورد نیاز در ساخت پنجره دوجداره با اندازه مشخص و گازهای مختلف (آرگون، کریپتون و زنون) را تقریب زدند. مواد در نظر گرفته شده در ساخت پنجره آلومینیوم، شیشه و گاز پرکننده بودند. همچنین میزان تولید گازهای آلاینده در تولید هر پنجره تقریب زده شد. براساس تحلیل آنها، پنجره های حاوی گاز آرگون شامل کمترین انرژی ساخت و کمترین میزان گازهای آلاینده هستند.

گویا و همکاران در سال ۲۰۱۲ [17]، یک مدل عددی را برای شبیه سازی انتقال حرارت در پنجره های چندجداره با لایه از جنس ماده تغییر فاز دهنده ارائه داده و نتایج عددی خود را با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی نمودند. در حالی که توافق خوبی بین نتایج شبیه سازی عددی و داده های آزمایشگاهی در زمینه دمای سطح شیشه ها وجود دارد، اما میزان شار حرارتی و شدت تشعشع انتقالی از پنجره به کمک روش عددی محاسبه شده، دقت زیادی ندارد. این میزان خطا در روش عددی به دلیل فرضیات ساده کننده مدل عددی ارائه شده است.

بوراتی و مورتی در سال ۲۰۱۲ [18, 19]، تأثیر استفاده از لایه عایق آبروژل در پنجره های دوجداره به منظور کاهش تلفات انرژی در ساختمان را به روش آزمایشگاهی بررسی کردند. طبق محاسبات آنها، استفاده از لایه آبروژل در ایتالیا باعث کاهش اتلاف حرارتی ساختمان به میزان ۶۲٪ نسبت به پنجره دوجداره ساده می شود.

اخیراً گویدار و همکاران [20]، تأثیر استفاده از شیشه های مختلف (شیشه شفاف، شیشه منعکس کننده و شیشه با ضریب تابش کم) را برای کاهش تلفات حرارتی از پنجره دوجداره در شرایط آب و هوایی مکزیک بررسی کردند. طبق مطالعات آنها، در این شرایط آب و هوایی، شیشه منعکس کننده، بهترین عملکرد را در مقایسه با بقیه دارد.

با مرور کارهای انجام شده در زمینه پنجره های چندجداره مشخص می شود علی رغم تحقیقات گسترده در زمینه افزایش عملکرد آنها، هنوز بررسی جامعی در رابطه با میزان تأثیر گازهای پرکننده و ضخامت لایه گاز در کاهش تلفات گرمایی و سرمایی کل ساختمان



شکل ۳) بخشی از شبکه استفاده شده برای شبیه سازی انتقال حرارت در پنجره دوجداره (شکل راست) و پنجره سه جداره (شکل چپ)

تعداد سلول مورد استفاده در پنجره دوجداره ۶۵۰۰۰ و برای پنجره سه جداره ۱۱۰۰۰۰ است. معادله انرژی در میدان حل نشان داده شده با استفاده از نرم افزار FLUENT حل شده است. معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت با استفاده از روش بالادست مرتبه دوم گسسته سازی شده است. برای برقراری ارتباط صحیح بین فشار، سرعت و محاسبه میدان فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است.

مقدار شار هدایتی عبوری از واحد سطح پنجره های دوجداره و سه جداره برای گازهای پرکننده مختلف در جدول ۲ آمده است. با توجه به این جدول، با استفاده از پنجره سه جداره پر شده با آرگون، شار هدایتی عبوری نسبت به پنجره دوجداره ۵۰٪ کاهش می یابد. همچنین مقدار شار هدایتی عبوری از پنجره های دوجداره و سه جداره، با استفاده از آرگون و کریپتون به جای هوا به ترتیب برابر ۲۷ و ۶۰٪ کاهش می یابد.

جدول ۲) شار هدایتی عبوری از واحد سطح پنجره های دوجداره و سه جداره برای گازهای پرکننده مختلف محاسبه شده به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

نوع گاز پرکننده	شار هدایتی پنجره دوجداره (Btu/hr.ft ²)	شار هدایتی پنجره سه جداره (Btu/hr.ft ²)
هوا	۴۰/۳	۲۰/۳
آرگون	۲۹/۷	۱۴/۹
کریپتون	۱۵/۹	۸

۲-۲- تأثیر استفاده از پنجره های چندجداره با تعداد لایه و گازهای مختلف در کاهش تلفات حرارتی ساختمان

در این قسمت از نرم افزار Carrier به محاسبه میزان اتلاف گرمایی و سرمایی ساختمان نمونه با استفاده از انواع مختلف پنجره چندجداره پرداخته می شود.

بار گرمایی ساختمان، مجموع تلفات حرارتی هدایتی از جداره های ساختمان (دیوار، سقف، کف، در و پنجره) و همچنین تلفات حرارتی در نتیجه نفوذ هوای سرد خارج به داخل ساختمان است. بار سرمایی ساختمان از مجموع بار هدایتی و تابشی از پنجره ها و جداره های خارجی، بار هدایتی از جداره های داخلی، بار محسوس ناشی از تهویه اتاق ها و بار محسوس ناشی از ساکنان و وسایل گرمایی داخل اتاق ها تشکیل می شود [21].

نرم افزار Carrier یک ابزار رایانه ای است که به مهندسان کمک

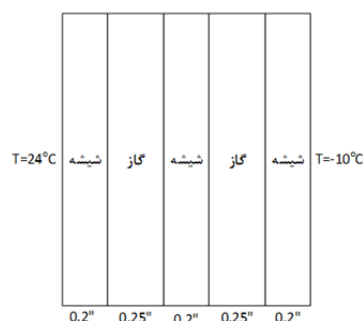
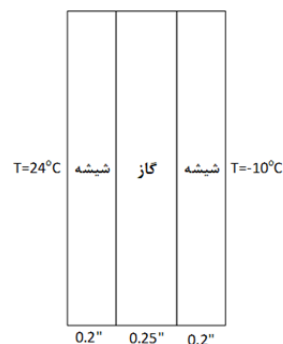
انجام نشده است. در این مقاله، میزان تأثیر گازهای مختلف با ضخامت های گوناگون در پنجره های دوجداره و سه جداره به منظور کاهش تلفات سرمایی و گرمایی کل ساختمان بررسی می شود.

۲- ارایه نتایج

برای بررسی میزان تأثیر استفاده از پنجره های چندجداره در کاهش تلفات حرارتی، ابتدا مقدار شار هدایتی عبوری از پنجره های چندجداره مختلف با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) تعیین شده است. در ادامه، مقدار بار حرارتی و برودتی یک ساختمان نمونه و بار اتلافی از پنجره ها با استفاده از نرم افزار Carrier محاسبه شده است. ساختمان نمونه، یک ساختمان مسکونی سه طبقه با زیربنای ۱۰۲ متر مربع در شهر اصفهان است. برای مقایسه بارهای گرمایشی و سرمایشی ساختمان، ساختمان مورد نظر را در چندین حالت با پنجره های مختلف در نرم افزار مدل سازی می کنند و با در نظر گرفتن سیستم فن کوئل برای آن، بارهای گرمایشی و سرمایشی ساختمان و تلفات حرارتی پنجره ها محاسبه می شود. همچنین برای بررسی تأثیر قاب های مختلف در کاهش تلفات حرارتی ساختمان، مقدار تلفات گرمایی و سرمایی ساختمان به ازای قاب های مختلف تعیین می شود.

۲-۱- بررسی تأثیر استفاده از گازهای مختلف در کاهش تلفات حرارتی هدایتی از پنجره های چندجداره با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

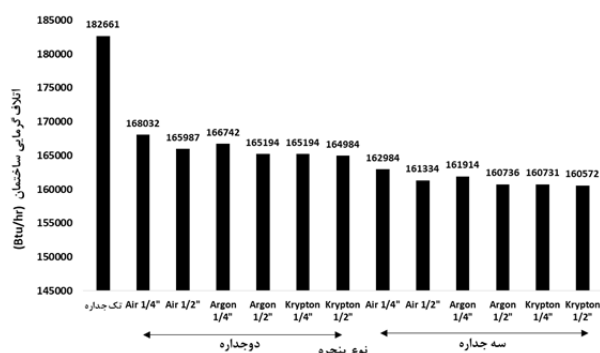
در این قسمت، میزان شار حرارتی عبوری از پنجره دوجداره و سه جداره نشان داده شده در شکل ۲، به ازای گازهای مختلف با هم مقایسه می شود. ضخامت شیشه ها برابر ۰/۲ اینچ، ضخامت لایه های گاز برابر ۰/۲۵ اینچ و ارتفاع پنجره برابر یک متر در نظر گرفته شده است. دمای شیشه داخلی ۲۴°C و دمای شیشه خارجی ۱۰°C- است. هندسه مربوط به پنجره های دوجداره و سه جداره شبیه سازی شده، در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین بخشی از شبکه مورد استفاده برای دو پنجره در شکل ۳ آمده است.



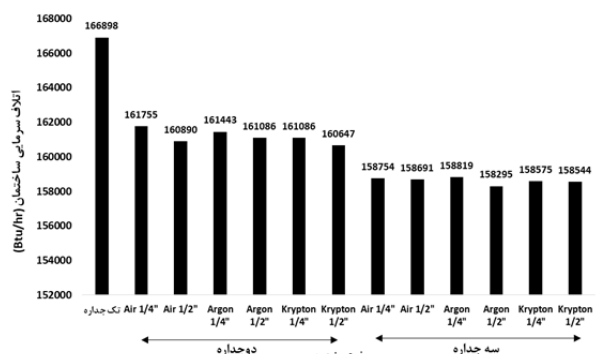
شکل ۲) هندسه مربوط به پنجره دوجداره (شکل بالا) و پنجره سه جداره (شکل پایین) برای شبیه سازی انتقال حرارت هدایتی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

ساختمان به‌ازای پنجره‌های مختلف با گازها و ضخامت‌های گوناگون ترسیم شده است. با بررسی و تحلیل این نمودارها و جدول ۴، نتایج زیر به دست می‌آید:

همان‌طور که انتظار می‌رود، پنجره‌های سه‌جداره کمترین میزان هدررفت انرژی را در میان پنجره‌های بررسی شده دارند. گاز کریپتون بهترین عملکرد حرارتی را نسبت به دو گاز دیگر داشته و کمترین اتلاف انرژی را دارا است، اما به دلیل گران بودن این نوع پنجره‌ها خیلی کم از آنها استفاده می‌شود. هوا بین گازهای بررسی شده، عملکرد ضعیف‌تری را از خود نشان می‌دهد و انرژی بیشتری را هدر می‌دهد. بیشترین میزان صرفه‌جویی نسبت به پنجره‌های تک‌جداره، حدود ۱۲٪ بوده که نسبت به سهمی که پنجره‌ها در اتلافات حرارتی ساختمان دارند، میزان قابل توجهی است. البته باید توجه داشت که در این حالت، ضریب انتقال حرارت پنجره‌ها تقریباً $0.35 \text{ Btu}/(\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F})$ بوده که حتی از ضریب انتقال حرارت برخی از دیواره‌های ساختمان نیز کمتر است.



نمودار ۱) مقدار اتلاف گرمایی ساختمان به‌ازای پنجره‌های مختلف با گازها و ضخامت‌های گوناگون



نمودار ۲) مقدار اتلاف گرمایی ساختمان به‌ازای پنجره‌های مختلف با گازها و ضخامت‌های گوناگون

با مقایسه دو ستون اول نمودارهای ۱ و ۲ که مربوط به پنجره تک‌جداره و پنجره دوجداره پر شده با هوا است، کاملاً مشاهده می‌شود که استفاده از ساده‌ترین پنجره‌های چندجداره نیز می‌تواند باعث کاهش قابل توجه انرژی اتلافی در ساختمان شود و تلفات حرارتی کل ساختمان را تا ۸٪ کاهش دهد.

برای بررسی بهتر نقش پنجره‌های چندجداره در ساختمان، بهتر است میزان تلفات گرمایی و سرمایی از پنجره‌های کل ساختمان به‌ازای پنجره‌های مختلف با هم مقایسه شود. جدول ۵، مقدار تلفات حرارتی از پنجره‌های ساختمان برای پنجره‌های مختلف با

می‌کند که سیستم‌های تهویه مطبوع مناسب را برای ساختمان‌ها طراحی کنند. این نرم‌افزار از روش عملکرد تایید شده توسط /شری برای محاسبه بارها و همچنین تحلیل‌های انرژی داخل ساختمان استفاده می‌کند [22].

برای محاسبه میزان بارهای گرمایی و سرمایی ساختمان توسط نرم‌افزار Carrier، تکمیل قسمت‌های آب و هوا، فضاها و سیستم‌ها در نرم‌افزار لازم است. مشخصات آب و هوایی منطقه از جمله طول و عرض جغرافیایی و شرایط طرح خارج تابستانی و زمستانی در قسمت آب و هوا وارد می‌شود. مشخصات فضاها در ساختمان از جمله وزن فضاها بر واحد سطح، اطلاعات دیوارها، پنجره‌ها و درب‌ها، سقف‌ها و نورگیرها و همچنین نفوذ هوا به داخل ساختمان در قسمت فضاها وارد می‌شود. مشخصات سیستم تهویه مطبوع استفاده شده برای گرمایش و سرمایش ساختمان در قسمت سیستم‌ها وارد می‌شود. پس از اتمام ورود اطلاعات پروژه به نرم‌افزار، می‌توان محاسبات را توسط نرم‌افزار انجام داد و نتایج حاصل را مشاهده نمود.

برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده توسط Carrier، میزان تلفات گرمایی ساختمان که با استفاده از محاسبات دستی [21] به دست آمده، با نتایج حاصل از نرم‌افزار Carrier در جدول ۳ مقایسه شده است. چون میزان درصد اختلاف نتایج حدود ۱٪ بوده، نتایج به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار Carrier در این مقاله قابل اعتماد است.

جدول ۴، مقدار تلفات گرمایی کل ساختمان برای پنجره‌های مختلف با گازهای پرکننده و فواصل میانی گوناگون و همچنین درصد کاهش تلفات گرمایی نسبت به حالت تک‌جداره را ارائه می‌دهد.

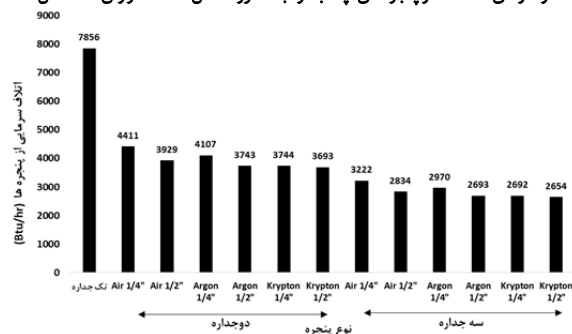
جدول ۳) بار گرمایشی ساختمان محاسبه شده به‌صورت دستی و با استفاده از نرم‌افزار Carrier، پنجره‌های ساختمان دوجداره پر شده با هوا با ضخامت ۰/۲۵ اینچ

بار گرمایشی با محاسبات بار گرمایشی با نرم‌افزار کریر درصد اختلاف دستی (Btu/hr)	بار گرمایشی با محاسبات بار گرمایشی با نرم‌افزار کریر درصد اختلاف دستی (Btu/hr)
۱۶۸۰۳۲	۱۶۹۷۴۱

جدول ۴) تلفات گرمایی ساختمان برای پنجره‌های مختلف

نوع پنجره	فاصله میانی گاز پرکننده	اتلاف گرمایی (Btu/hr)	درصد کاهش تلفات
تک جداره	-	۱۸۲۶۶۱	۰
دوجداره	۱/۴"	۱۶۸۰۳۲	۸
	۱/۲"	۱۶۵۹۸۷	۹/۱۲
	۱/۴"	۱۶۶۷۴۲	۸/۷۱
	۱/۲"	۱۶۵۱۹۴	۹/۵۶
	۱/۴"	۱۶۵۱۹۴	۹/۵۶
	۱/۲"	۱۶۴۹۸۴	۹/۶۷
سه جداره	۱/۴"	۱۶۲۹۸۴	۱۰/۷۷
	۱/۲"	۱۶۱۳۳۴	۱۱/۶۷
	۱/۴"	۱۶۱۹۱۴	۱۱/۳۵
	۱/۲"	۱۶۰۷۳۶	۱۲
	۱/۴"	۱۶۰۷۳۱	۱۲
	۱/۲"	۱۶۰۵۷۲	۱۲/۰۹

در نمودارهای ۱ و ۲، به‌ترتیب مقدار اتلاف گرمایی و سرمایی



نمودار ۴) مقدار اتلاف گرمایی از پنجره‌ها به‌ازای گازها و ضخامت‌های

۲-۳- بررسی تأثیر قاب‌های مختلف در کاهش تلفات حرارتی ساختمان

پنجره‌ها فقط از واحدهای شیشه‌ای تشکیل نمی‌شوند و قاب آنها نیز نقش مهمی در انتقال حرارت و هدررفت گرما دارد. برای دستیابی به یک عملکرد مناسب حرارتی در پنجره‌های ساختمان، افزایش تعداد جداره‌ها و پُرکردن واحدهای شیشه‌ای با گازهای گرانبه‌تر به‌تنهایی نتیجه نخواهد داد و باید به اصلاح قاب پنجره‌ها نیز توجه نمود.

در مدل‌سازی کلیه پنجره‌هایی که در قسمت قبل مورد بررسی قرار گرفت، از قاب یوپی‌وی‌سی استفاده شد. اما اکنون برای بررسی تأثیر استفاده از قاب‌های مختلف در پنجره‌های چندجداره، مدل‌سازی پنجره دوجداره پرشده با گاز آرگون در فاصله میانی ۱/۲ با چهار نوع قاب مختلف که در ساخت پنجره‌های چندجداره کاربرد بیشتری دارند، انجام شده و نتایج این مدل‌سازی‌ها در جدول‌های ۶ و ۷ آمده است. جدول‌های ۶ و ۷ به‌ترتیب مقادیر تلفات انرژی کل ساختمان و تلفات انرژی از پنجره‌های ساختمان را به‌ازای قاب‌های مختلف ارائه می‌دهد.

جدول ۶) مقدار اتلاف گرمایی و سرمایی ساختمان به‌ازای قاب‌های مختلف

جنس قاب	اتلاف گرمایی ساختمان (Btu/hr)	درصد کاهش تلفات	اتلاف سرمایی ساختمان (Btu/hr)	درصد کاهش تلفات
آلومینیوم	۱۷۳۷۸۵	۰	۱۶۵۱۹۴	۰
ترمال بریک	۱۶۹۰۶۴	۲/۷۱	۱۶۲۷۳۷	۱/۴۸
چوب	۱۶۵۸۲۳	۴/۵۸	۱۶۱۳۳۷	۲/۳۳
یوپی‌وی‌سی	۱۶۵۱۹۴	۴/۹۴	۱۶۱۰۸۶	۲/۴۸

جدول ۷) مقدار تلفات گرمایی و سرمایی از پنجره‌های ساختمان به‌ازای قاب‌های مختلف

جنس قاب	اتلاف گرمایی پنجره‌ها (Btu/hr)	درصد کاهش تلفات	اتلاف سرمایی پنجره‌ها (Btu/hr)	درصد کاهش تلفات
آلومینیوم	۲۱۲۸۹	۰	۵۷۶۶	۰
ترمال بریک	۱۷۱۸۴	۱۹/۲۸	۴۶۵۴	۱۹/۲۸
چوب	۱۴۳۶۶	۳۲/۵۱	۳۸۹۱	۳۲/۵۱
یوپی‌وی‌سی	۱۳۸۱۸	۳۵/۰۹	۳۷۴۳	۳۵/۰۸

با بررسی این جدول‌ها مشاهده می‌شود که با استفاده از قاب‌های یوپی‌وی‌سی می‌توان تا ۵٪ از بارهای گرمایشی و ۲/۵٪ از بارهای سرمایشی کل ساختمان را کاهش داد که با توجه به مساحت کم قاب‌ها نسبت به کل جداره‌های ساختمان، مقدار قابل توجهی است. همچنین استفاده از قاب‌های یوپی‌وی‌سی که رایج‌ترین و پراستفاده‌ترین قاب‌ها در ساخت پنجره‌های چندجداره است، می‌تواند حدود ۳۵٪ تلفات حرارتی پنجره‌ها را کاهش دهد.

گازهای پرکننده و فواصل میانی گوناگون و همچنین درصد کاهش تلفات گرمایی نسبت به حالت تک‌جداره را ارائه می‌دهد.

جدول ۵) تلفات گرمایی از پنجره‌های ساختمان به‌ازای پنجره‌های مختلف

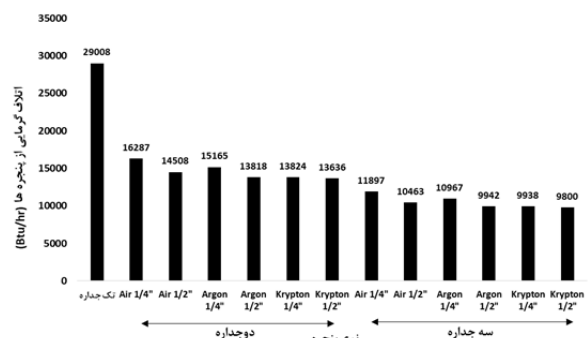
نوع پنجره	فاصله میانی گاز پُرکننده	اتلاف گرمایی ساختمان (Btu/hr)	درصد کاهش تلفات
تک‌جداره	-	۲۹۰۰۸	۰
دوجداره	۱/۴" هوا	۱۶۲۸۷	۴۳/۸۵
	۱/۲" هوا	۱۴۵۰۸	۴۹/۹۸
	۱/۴" آرگون	۱۵۱۶۵	۴۷/۷۲
	۱/۲" آرگون	۱۳۸۱۸	۵۲/۳۶
	۱/۴" کریپتون	۱۳۸۲۴	۵۲/۳۴
	۱/۲" کریپتون	۱۳۶۳۶	۵۲/۹۹
سه‌جداره	۱/۴" هوا	۱۱۸۹۷	۵۸/۹۸
	۱/۲" هوا	۱۰۴۶۳	۶۳/۹۳
	۱/۴" آرگون	۱۰۹۶۷	۶۲/۱۹
	۱/۲" آرگون	۹۹۴۲	۶۵/۷۲
	۱/۴" کریپتون	۹۹۳۸	۶۵/۷۴
	۱/۲" کریپتون	۹۸۰۰	۶۶/۲۱

در نمودارهای ۳ و ۴، به‌ترتیب مقدار اتلاف گرمایی و سرمایی از پنجره‌های ساختمان به‌ازای پنجره‌های مختلف با گازها و ضخامت‌های گوناگون ترسیم شده است. با بررسی این نمودارها و جدول ۵ نتایج زیر به دست می‌آید:

استفاده از ضعیف‌ترین نوع پنجره چندجداره نیز می‌تواند هدررفت انرژی از طریق پنجره‌ها را به میزان قابل توجهی (تقریباً ۴۴٪) کاهش دهد. همان‌طور که در نمودارهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، اندازه فاصله میانی نقش مهمی در عملکرد حرارتی پنجره‌ها ایفا می‌کند، به‌طوری که یک پنجره دوجداره پرشده با هوا و ضخامت ۱/۲ نسبت به پنجره دوجداره پرشده با گاز آرگون و ضخامت ۱/۴، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد.

با توجه به نمودارهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که نتایج مربوط به بار حرارتی پنجره‌هایی که با گاز کریپتون پر شده‌اند، در فواصل میانی متفاوت، اختلاف زیادی با هم ندارند. می‌توان گفت اندازه فاصله میانی تأثیر زیادی در این پنجره‌ها ندارد و گاز کریپتون در فواصل کمتر نیز عملکرد خوبی دارد. با توجه به اینکه عملکرد گاز کریپتون، وابستگی زیادی به اندازه فاصله میانی در پنجره‌ها ندارد، استفاده از این گاز در پنجره‌های سه‌جداره و چهارجداره کاربرد بیشتری دارد و باعث کاهش ضخامت نهایی پنجره‌ها می‌شود، زیرا می‌توان از اسپیسرهای باریک‌تری استفاده نمود.

با مقایسه میزان کاهش تلفات حرارتی، مشاهده می‌شود که با استفاده از پنجره‌های دوجداره پرشده با گاز آرگون که رایج‌ترین و پراستفاده‌ترین نوع پنجره‌های چندجداره هستند، به‌سادگی می‌توان حدود ۵۰٪ تلفات حرارتی پنجره‌ها را کاهش داد.



نمودار ۳) مقدار اتلاف گرمایی از پنجره‌ها به‌ازای گازها و ضخامت‌های گوناگون

- 4- Tian Ch, Chen T, Yang H, Chung TM. A generalized window energy rating system for typical office buildings. *Solar Energy*. 2010;84(7):1232-1243.
- 5- Karlsson J, Roos A. Evaluation of window energy rating models for different houses and European climates. *Solar Energy*. 2004;76(1-3):71-77.
- 6- Rijal HB, Tuohy P, Humphreys MA, Nicol JF, Samuel A, Clarke J. Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings*. 2007;39(7):823-836.
- 7- Banihashemi S, Golizadeh H, Hosseini MR, Shakouri M. Climatic, parametric and non-parametric analysis of energy performance of double-glazed windows in different climates. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2015;4(2):307-322.
- 8- Aydin O. Determination of optimum air-layer thickness in double-pane windows. *Energy and Buildings*. 2000;32(3):303-308.
- 9- Arıcı M, Karabay H, Kan M. Flow and heat transfer in double, triple and quadruple pane windows. *Energy and Buildings*. 2015;86:394-402.
- 10- Carlos JS, Corvacho H, Silva PD, Castro-Gomes JP. Modelling and simulation of a ventilated double window. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31(1):93-102.
- 11- Chow TT, Li Ch, Lin Z. Thermal characteristics of water-flow double-pane window. *International Journal of Thermal Sciences*. 2011;50(2):140-148.
- 12- Dalal R, Naylor D, Roeleveld D. A CFD study of convection in a double glazed window with an enclosed pleated blind. *Energy and Buildings*. 2009;41(11):1256-1262.
- 13- De Giorgi L, Bertola V, Cafaro E. Thermal convection in double glazed windows with structured gap. *Energy and Buildings*. 2011;43(8):2034-2038.
- 14- Avedissian T, Naylor D. Free convective heat transfer in an enclosure with an internal louvered blind. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008;51(1-2):283-293.
- 15- Hanby VI, Cook MJ, Infield DG, Ji Y, Loveday DL, Mei L, et al. Nodal network and CFD simulation of airflow and heat transfer in double skin facades with blinds. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2008;29(1):45-59.
- 16- Weir G, Muneer T. Energy and environmental impact analysis of double-glazed windows. *Energy Conversion and Management*. 1998;39(3-4):243-256.
- 17- Goia F, Perino M, Haase M. A numerical model to evaluate the thermal behaviour of PCM glazing system configurations. *Energy and Buildings*. 2012;54:141-153.
- 18- Buratti C, Moretti E. Glazing systems with silica aerogel for energy savings in buildings. *Applied Energy*. 2012;98:396-403.
- 19- Buratti C, Moretti E. Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems. *Applied Energy*. 2012;97:430-437.
- 20- Aguilar JO, Xamán J, Olazo-Gómez Y, Hernández-López I, Becerra G, Jaramillo OA. Thermal performance of a room with a double glazing window using glazing available in Mexican market. *Applied Thermal Engineering*. 2017;119:505-515.
- 21- Tabatabaei M. Calculations of building facilities. 7th Edition. Tehran: Roozbahan; 2002. [Persian]
- 22- Vakiloroya V. Design of air-conditioning systems using Carrier v4.5. 1th Edition. Tehran: Sane; 2011. [Persian]

با بررسی داده‌های جدول ۶ مشاهده می‌شود که میزان کاهش اتلاف گرمایی ساختمان نسبت به اتلاف سرمایی برای قاب‌های مختلف بیشتر است. در واقع قاب‌های عایق در کاهش تلفات گرمایی ساختمان تاثیر بیشتری دارند.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر استفاده از پنجره‌های چندجداره با تعداد لایه، گاز پرکننده و ضخامت میانی مختلف در کاهش تلفات انرژی ساختمان بررسی شد. همچنین اثرات استفاده از قاب‌های گوناگون برای پنجره‌های چندجداره مطالعه شد. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله به‌صورت زیر است:

۱- از بررسی نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله مشخص است که بهترین نوع پنجره در میان پنجره‌هایی که بررسی شد، پنجره سه‌جداره پر شده با گاز کریپتون است که به‌کاربردن این پنجره، عملکرد حرارتی پنجره‌ها را تا ۶۶٪ بهبود می‌بخشد. اما به‌دلیل مشکلات تهیه پنجره‌های پر شده با گاز کریپتون و قیمت زیاد پنجره‌های سه‌جداره نسبت به پنجره‌های دوجداره، از این نوع پنجره‌ها در ساختمان‌های معمولی استفاده نمی‌شود و تولید آنها نیز فقط به چند کشور خاص محدود می‌شود. ولی در آینده‌ای نزدیک با پیشرفت تکنولوژی تولید این پنجره‌ها و رسیدن به تولید انبوه در کشورهای دیگر، امکان استفاده از آنها در ساختمان‌ها فراهم خواهد شد.

۲- پنجره‌هایی که امروزه بیشترین سهم فروش در بازار را به خود اختصاص می‌دهند، پنجره‌های یوپی‌وی‌سی با واحدهای شیشه‌ای دوجداره پر شده با گاز آرگون هستند. این دسته از پنجره‌ها در اندازه‌های مختلف با قیمت مناسب قابل تهیه هستند و با به‌کاربردن آنها می‌توان حدود ۵۰٪ انرژی اتلافی از پنجره‌های ساختمان را کاهش داد.

۳- با جایگزینی قاب‌های آلومینیومی ساده با قاب‌های یوپی‌وی‌سی به‌راحتی می‌توان ۳۵٪ تلفات حرارتی پنجره‌ها را کاهش داد که این نکته اهمیت استفاده از قاب مناسب برای پنجره‌ها را مشخص می‌کند.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: حامد باقری اسفه (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روشن‌شناس/پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ مصطفی شهریار (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

منابع

- 1- Arıcı M, Karabay H. Determination of optimum thickness of double-glazed windows for the climatic regions of Turkey. *Energy and Buildings*. 2010;42(10):1773-1778.
- 2- Butkus J, Vladišauskas A, Jakevičius L. The use of ultrasound for investigation of glazing units. *Ultragarasas*. 2004;2(51):7-12.
- 3- UPVC CENTER. Specifications of double-glazed Windows [Internet]. Isfahan: UPVC Center; 2016 [cited November 10, 2018]. [Persian]. Available from: <http://www.upvccenter.com/Article/1214>