ISSN: 27170128
EISSN: 27170136

Journal of Urban Sustainable Development
Vol. 5, No. 16, Autumn 2024, 65-82
https://usdjournal.daneshpajoohan.ac.ir/

USD Journal

A Review of Building Window Glazing with High Performance in Heat Transfer

Sajede Karimian[1]*, Yousef Gorji Mehlabani [2]

Received:2024/02/29 Revised: 2024/05/05 Accepted: 2024/06/08 Published: 2024/10/06

Highlights

- Glazing is one of the important indicators of a building's energy efficiency, and extensive research has been done on it since the last decades.
- This article examines the performance of various window glazing technologies and covers the physical characteristics of static glazing and dynamic glazing technologies.
- This review emphasizes this general relationship at the design stage so that designers have a broader view of product selection, as well as sufficient knowledge to ensure various other benefits for improved comfort, reduced mechanical loads, and improved energy performance.
- Among the main results, we found that, although several advances have been made in this field in the last decade, more research is needed to develop window technologies that not only have high insulating properties but can also generate energy.

Extended Abstract

Introduction

Glazing is one of the important indicators of a building's energy efficiency, and extensive research has been done on it since the last decades. Poorly designed skylights, windows, and glazed surfaces can create an unpleasant environment. Currently, various types of glazing with different functions are used. The physical properties of glazing affect daylight quality, thermal properties, and energy-saving potential. This article examines the performance of various window glazing technologies and covers the physical characteristics of static glazing and dynamic glazing technologies. In window technologies. In this article, we discuss the relationship between the physical and optical parameters of different types of glazings and their heat transfer value. In addition, this article also provides readers with a wide range of information, including new research in glazing technologies. This review emphasizes this general relationship at the design stage so that designers have a broader view of product selection, as well as sufficient knowledge to ensure various other benefits for improved comfort, reduced mechanical loads, and improved energy performance. Among the main results, we found that, although several advances have been made in this field in the last decade, more research is needed to develop window technologies that not only have high insulating properties but can also generate energy.

Theoretical Framework

The theoretical framework of this study on high-performance glazing technologies centers around key concepts such as energy efficiency, thermal performance, optical properties, dynamic glazing technologies, and their implications for sustainability and occupant comfort. It explores how different glazing types can reduce energy consumption by minimizing heating and cooling loads, evaluated through metrics like U-value, solar heat gain coefficient, and visible transmittance. Additionally, it examines the interaction of light with glazing materials for enhanced daylighting and visual comfort, while highlighting advanced systems like electrochromic and thermochromics glazing that adapt to

[1] * Master Student of Architecture, Department of Architecture & Energy, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran; Corresponding Author, Email:sajedekarimian0111@gmail.com.
[2] Professor, Department of Architecture & Energy, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

environmental conditions. Overall, this framework aims to provide a holistic understanding of how effective glazing can improve building energy efficiency and support sustainable architectural practices.

Methodology

The methodology of this study on high-performance glazing technologies involves a systematic approach, beginning with a comprehensive literature review of scholarly articles and industry reports to gather insights on various glazing technologies and their thermal and optical properties. It includes the collection of data on performance metrics such as U-value, solar heat gains coefficient (SHGC), and visible transmittance (VT) to compare the effectiveness of different glazing types. Selected case studies of buildings using advanced glazing systems are analyzed to assess real-world performance and energy consumption impacts. A comparative analysis evaluates the advantages and disadvantages of both static and dynamic glazing technologies, while a sustainability assessment measures their contribution to energy savings and indoor environmental quality. Finally, the study formulates recommendations for designers and architects to optimize glazing choices for enhanced energy efficiency and occupant comfort.

Results & Discussion

The results of the study indicate that advanced glazing technologies significantly enhance energy efficiency in buildings, with findings showing that both static and dynamic systems can effectively reduce heat transfer and improve occupant comfort. The comparative analysis revealed that while dynamic glazing systems, such as electrochromic and thermochromics options, offer superior adaptability to changing environmental conditions, static systems still provide substantial thermal insulation benefits. Additionally, the sustainability assessment highlighted the potential for these technologies to lower carbon footprints and contribute to energy savings. Overall, the study emphasizes the need for continued research and innovation in glazing technologies to further optimize their performance and integration in building design.

Conclusion

In conclusion, this study underscores the critical role of high-performance glazing technologies in enhancing building energy efficiency and occupant comfort. The comprehensive analysis of various glazing systems reveals that both static and dynamic options offer significant benefits in reducing heat transfer and energy consumption. As the demand for sustainable building practices grows, the findings advocate for ongoing research and development in glazing technologies to maximize their effectiveness and integration into modern architectural designs, ultimately contributing to a more energy-efficient and environmentally friendly built environment.

Keywords

Glazing, Window, Thermal Performance, Optical Performance

Citation:

Karimian, S., & Gorji Mahlabani, Y. (2024). A Review of Building Window Glazing with High Performance in Heat Transfer. *Journal of Urban Sustainable Development*, *5*(16), 65-82.

DOI: https://doi.org/10.22034/usd.2024.2024042.1219

DOR: https://dorl.net/dor/20.1001.1.27170128.1403.5.16.4.6

URL: https://usdjournal.daneshpajoohan.ac.ir/article_711798.html?lang=en

Authors retain the copyright and full publishing rights.
Published by Daneshpajoohan Pishro Higher Education Institute. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

نشریه علمی توسعه پایدار شهری
دوره ۵، شماره ۱۶، پاییز ۱۴۰۳، ۸۲-۶۵
https://usdjournal.daneshpajoohan.ac.ir/
USD Journal
ISSN: 27170128
EISSN: 27170136
مقاله پژوهشی
https://doi.org/10.22034/usd.2024.2024042.1219

مروری بر شیشه‌ی پنجره‌های ساختمان با عملکرد بالا در انتقال حرارت

ساجده کریمیان[۱*]، یوسف گرجی مهلبانی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵

چکیده: شیشه‌ها یکی از شاخص‌های مهم بهره‌وری انرژی یک ساختمان هستند و از دهه‌های گذشته تاکنون تحقیقات گسترده‌ای روی آن‌ها انجام‌شده است. نورگیرها، پنجره‌ها و سطوح شیشه دار با طراحی ضعیف می‌توانند محیطی ناخوشایند ایجاد کنند. در حال حاضر انواع شیشه‌های متنوع با کارایی‌های مختلف مورداستفاده قرار می‌گیرد. ویژگی‌های فیزیکی شیشه‌بر کیفیت نور روز، ویژگی‌های حرارتی و پتانسیل صرفه‌جویی در انرژی تأثیر می‌گذارد. این مقاله عملکرد فن‌آوری‌های مختلف شیشه‌ی پنجره را بررسی می‌کند و ویژگی‌های فیزیکی شیشه‌ی پنجره‌های ایستا و فناوری‌های پنجره‌های پویا و پیشرفته را پوشش می‌دهد. در این مقاله، ما رابطه‌ی بین پارامترهای فیزیکی و نوری انواع مختلف پنجره‌ها و مقدار انتقال حرارت آن را موردبحث قرار می‌دهیم. علاوه بر این، این مقاله همچنین طیف گسترده‌ای از اطلاعات، ازجمله تحقیقات جدید در فناوری‌های شیشه‌ی پنجره را در اختیار خوانندگان قرار می‌دهد. این بررسی بر این رابطه کلی در مرحله‌ی طراحی تأکید می‌کند تا طراحان در انتخاب محصول دید گسترده‌تری داشته باشند، همچنین دانش کافی برای اطمینان از مزایای مختلف دیگر برای بهبود آسایش، کاهش بار سیستم‌های تأسیسات و بهبود عملکرد انرژی را به دست بیاورند. پژوهشگران در میان نتایج اصلی دریافتند که اگرچه پیشرفت‌های متعددی در این زمینه در دهه‌ی گذشته به‌دست‌آمده است، تحقیقات بیشتری برای توسعه‌ی فناوری‌های پنجره موردنیاز است که نه‌تنها دارای خواص عایق بالایی باشند، بلکه بتوانند انرژی نیز تولید کنند.

واژگان کلیدی: شیشه، پنجره، عملکرد حرارتی، عملکرد نوری

[۱] * دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، گروه معماری و انرژی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران؛ نویسنده مسئول: sajedekarimian0111@gmail.com
[۲] استاد تمام، گروه معماری و انرژی، دانشکده‌ی معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران.

۱- مقدمه و بیان مسئله

توسعه‌ی سریع ساختمان‌سازی، افزایش شهرنشینی و پیشرفت‌های قابل‌توجه در این توسعه، به بهبود استاندارد زندگی شهری مردم کمک کرده است (Alrashed & Asif, 2015). اما طبق گزارش انجمن اطلاعات انرژی در سال ۲۰۱۸، مصرف جهانی انرژی تا سال ۲۰۴۰ در قسمت‌های ساخت‌وسازهای مسکونی، صنعتی، تجاری و شهری به دلیل توسعه‌ی صنعتی و رشد جمعیت به میزان ۶۴ درصد رشد خواهد کرد (Useia, 2018). درنتیجه، بلایای زیست‌محیطی و تغییرات آب‌وهوایی آشکارتر می‌شوند. پیش‌بینی می‌شود که میانگین دمای سطح زمین تا پایان سال ۲۱۰۰ از ۱.۱ درجه به ۶.۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد (IPCC, 2007- Pachauri & Reisinger, 2008). افزایش مصرف منابع طبیعی برای روشنایی، سرمایش، تهویه و گرمایش در ساختمان‌های تجاری و مسکونی به دلیل شتاب شهرنشینی باعث صرف هزینه‌های هنگفتی برای انرژی می‌شود؛ بنابراین، توجه به بهبود ساختمان برای صرفه‌جویی بهتر انرژی و ارتقای استراتژی‌های انرژی پایدار در بخش ساختمان ضروری است.

انتقال حرارت در پوسته‌ی ساختمان ۷۰ تا ۸۰ درصد انرژی مصرفی را تشکیل می‌دهد. طراحی و انتخاب مصالح مناسب به‌خصوص برای دیوارها و پنجره‌ها نقش مهمی در کنترل انتقال حرارت داخل و خارج ساختمان و حفظ آسایش حرارتی داخلی دارد (Anh & Pásztory2021). درعین‌حال، ازنظر مقاومت در برابر انتقال حرارت، پنجره ضعیف‌ترین جزء پوسته‌ی ساختمان است. فن‌آوری‌های شیشه‌ی پنجره در دهه‌های اخیر بسیار توسعه‌یافته است.

در فن‌آوری‌های اخیر برای کاهش انتقال حرارت از طریق پنجره، از مواد عایق با کم‌ترین رسانایی حرارتی مانند شیشه‌های چند جداره‌ی تحت خلأ، پرشده از گازهای بی‌اثر، ایروژل[1] و مواد تغییر فاز دهنده[2] استفاده می‌شود (Abu-Jdayil et al., 2021). بنابراین، شناخت انواع این فن‌آوری‌ها جهت استفاده در مراحل مختلف طراحی و ساخت ساختمان بسیار حائز اهمیت است.

مطالعات مختلفی توسط کریم پور و همکاران (۱۳۹۸)، شاعری و همکاران (۱۳۹۷)، پیلچی‌ها و همکاران (۱۳۹۹) و عسگری انارکی و همکاران (۱۳۹۸) انجام‌شده است. بااین‌حال تمام این مطالعات در مورد گازهای پرکننده‌ی جداره‌ها و تعداد جداره‌های شیشه هستند و مطالعه‌ای در مورد پوشش‌های روی شیشه و مشخصات آن‌ها برای متخصصان انجام‌نشده است. بنابراین، این پژوهش قصد دارد با مرور و بررسی شیشه‌های با عملکرد بالا درزمینه‌ی انتقال حرارت به این پرسش‌ها پاسخ دهد:

- انواع شیشه با عملکرد بالا در انتقال حرارت به چند دسته تقسیم می‌شوند؟
- پوشش‌های به‌کاررفته در شیشه‌های عملکرد بالا چیست؟
- انواع شیشه برای پنجره‌های ساختمان که عملکرد حرارتی بالایی دارند دارای چه ویژگی‌هایی هستند؟

در این تحقیق، ابتدا با بررسی تمام مقالات منتشرشده در مجلات داخلی و ۱۵ مقاله برجسته از منابع خارجی، به همراه ۱۰ مقاله مروری در زمینه فناوری‌های جدید برای شیشه‌های با عملکرد بالا در زمینه انتقال حرارت، به یک جمع‌بندی برای معماران و مهندسان ساختمان رسیدیم. این جمع‌بندی به‌منظور ارائه راهنمایی‌های کاربردی برای استفاده صحیح از این فناوری‌ها طراحی‌شده است.

۲- پیشینه و مبانی نظری پژوهش

پنجره‌ها به‌عنوان عناصر کلیدی در ساختمان‌ها نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند، زیرا تأثیر چشمگیری بر عملکردهای مختلف آن‌ها دارند. این عناصر، از طریق ورود نور مرئی، به تداوم و ارتباط بین فضای داخلی و خارجی کمک می‌کنند و از منظر زیبایی‌شناختی و روان‌شناختی اهمیت بسزایی دارند.

[1] Aerogel

[2] PCM

پنجره‌ها از طریق جذب خورشیدی که در فصل زمستان مطلوب است و در تابستان نامطلوب، و از طریق اتلاف حرارتی، نقش حیاتی در تعادل انرژی ساختمان ایفا می‌کنند. علاوه بر این، این عناصر به نور روز ورودی فضاها کمک کرده و از تغییرات آب‌وهوایی مختلف مانند باران، باد، گردوغبار و صدا محافظت می‌نمایند.

بنابراین، نقش پنجره‌ها در ساختمان‌ها به‌عنوان یکی از عناصر اساسی و مهم برای ارتقای عملکرد و زیبایی ساختمان‌ها بسیار حائز اهمیت است. این عناصر نه‌تنها به تعادل انرژی ساختمان کمک می‌کنند بلکه به ایجاد محیطی سالم و راحت برای ساکنان نیز کمک می‌نمایند.

فقدان مقالات مروری در پژوهش‌های فارسی مشهود است. اما مجلات خارجی، در سال ۲۰۱۵، کوکی و ریفات انواع شیشه‌های پیشرفته و هوشمند بررسی کردند و یک آزمایش روی پنجره‌ی اتاق یک‌خانه با چند شیشه‌ی پیشرفته انجام دادند. رضایی[1] و همکاران (۲۰۱۷) انواع شیشه را به سه دسته‌ی معمولی، پیشرفته و هوشمند دسته‌بندی کردند و طی مقاله‌ی خود به ویژگی‌های فیزیکی انواع شیشه‌ی پنجره‌ها با لایه‌بندی و رنگ متفاوت با در نظر گرفتن متغییرهایی مانند میزان عبور نور مرئی[2] و ضریب دریافت حرارت خورشیدی[3] شیشه‌ها را بررسی کردند. درنهایت، در سال ۲۰۲۳، میشل و همکاران در پژوهش مروری خود به روش پریزما تمام مقالات ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ دسته‌بندی کردند.

خالد و براردی[4] (۲۰۲۱) طی پژوهشی روی آخرین فناوری‌های پوشش برای شیشه‌ها که در بازار موجود هستند به این نتیجه رسیدند که پوشش‌های کم گسیل استاندارد فعلی صنعت هستند بعدازآن پوشش‌های فتوکرومیک و ترموکرومیک قابلیت صنعتی شدن رادارند و درنهایت پوشش‌های الکتروکرومیک و گازوکرومیک هنوز به دلیل هزینه‌ی بالا محدود هستند. در پژوهش پریرا[5] و همکاران (۲۰۲۲) که روی پوشش‌های کنترل‌کننده‌ی خورشیدی (SCFs[6]) روی شیشه‌های ساختمان صورت گرفت، یک‌راه حل غیرفعال با پتانسیل افزایش عملکرد شیشه‌های جدید یا بازسازی‌شده به‌خصوص در نیمکره‌ی شمالی و اقلیم‌های گرم دانستند.

قوشال و نئوگی[7] (۲۰۱۴) با مروری بر پژوهش‌های پیشین شیشه‌های الکتروکرومیک چند جداره را ازنظر مقاومت حرارت و نور مرئی دسته‌بندی کردند. هانگ[8] و همکاران (۲۰۲۱) بامطالعه روی انواع شیشه‌های با عملکرد بالا، آن‌ها را برای اقلیم‌های مختلف توصیه کردند.

در سال ۲۰۱۶، سلوا و همکاران، مشکل اصلی مصرف انرژی ساختمان‌های تجاری را پوشش زیاد شیشه‌ی آن‌ها دانستند و با معرفی انواع شیشه‌های پرشده با مواد تغییر فاز دهنده (PCM[9]) راه‌حلی کارا برای این مشکل پیشنهاد کردند. لی[10] و همکاران (۲۰۲۰) مشابه همین پژوهش را روی مواد تغییرفازدهنده انجام دادند و عملکرد نوری و حرارتی آن‌ها را در لایه‌بندی شیشه‌ی پنجره‌ها موردبررسی قراردادند. یک مقاله‌ی مروری توسط بوراتی[11] و همکاران (۲۰۲۱) در مورد شیشه‌های ایروژلی نوشته‌شده است که طی آن مراحل تهیه انواع این شیشه‌ها معرفی و درنهایت، عملکردهای حرارتی، ویژگی‌های نوری و صوتی بررسی‌شده است؛ و در آخر، یودین[12] و همکاران (۲۰۲۳) یک مقاله‌ی مروری روی انواع شیشه‌های تلفیق‌شده با سلول‌های فتوولتاییک نوشته‌اند و آن‌ها را به ۶ نوع دسته‌بندی کردند.

در بررسی‌های انجام‌شده در مقالات فارسی (جدول شماره ۱)، مروری بر انواع شیشه‌های با فناوری بالا انجام‌نشده است. درصورتی‌که مهندسان در اقلیم‌های مختلف ایران بسیار نیازمند آگاهی به وجود این شیشه‌ها برای پنجره‌ها هستند تا با بهره‌گیری درست آن‌ها در ساختمان‌سازی گامی بزرگ

[1] Rezaei et al
[2] Visible transmittance (T_v)
[3] Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)
[4] Khaled & Berardi
[5] Pereira
[6] Solar Control Films
[7] Ghoshal & Neogi
[8] Huang
[9] Phase Change Material
[10] Li
[11] Buratti
[12] Uddin

جهت کاهش مصرف انرژی بردارند؛ بنابراین این پژوهش بامطالعه و دسته‌بندی این شیشه‌ها و بررسی عملکرد حرارتی آن‌ها راهنمای خوبی برای مهندسان خواهد بود.

جدول ۱. پیشینه‌ی پژوهش

منبع	انواع	متغییرها
Cuce & Riffat, 2015	پیشرفته هوشمند	لایه‌بندی، رنگ، کم گسیل
Rezaei et al., 2017	معمولی پیشرفته هوشمند	T_v, SHGC لایه‌بندی، رنگ
Michael et al., 2023	ایستا پویا	ضخامت، مقاومت حرارتی، عبور نور مرئی
Khaled & Berardi, 2021	پوشش‌های روی شیشه	صنعتی شدن هزینه
Pereira et al., 2022	پوشش‌های روی شیشه	Tv, Te[1], Qv[2], U[3]
Ghoshal & Neogi, 2014	۱ و ۲ و ۳ جداره	مقاومت حرارتی، عبور نور مرئی
Huang et al., 2021	الکتروکرومیک	هوا جریان، مواد تغییر فاز دهنده و ایروژل
Silva et al., 2016	فناوری‌های کاربردی و تجزیه‌وتحلیل عملکرد آن	دما، شدت حرارت، SHGC, PMV
Li et al., 2020	مواد تغییر فاز دهنده	عملکرد نوری و حرارتی
Buratti et al., 2021	مواد تغییر فاز دهنده	عملکرد حرارتی و نوری، ویژگی‌های صوتی
Uddin et al., 2023	ایروژل	لایه‌بندی، ابعاد سلول‌ها، ضخامت
	فتوولتاییک	

۱-۲- عملکرد نوری و حرارتی

پنجره‌ها به دلیل شفافیت، یک عنصر کلیدی از سیستم‌های انرژی ساختمان‌ها هستند (Jelle et al., 2012- Singh & Garg, 2010) که تأثیر قابل‌توجهی برآسایش حرارتی، بصری و صوتی می‌گذارند؛ بنابراین طراحی مناسب پنجره‌ها در ساختمان‌های جدید برای کاهش مصرف انرژی مربوط به روشنایی و تهویه مطبوع ضروری است. این چالش در ساختمان‌های قدیمی با اجزای قدیمی که استانداردهای فعلی را برآورده نمی‌کنند، حتی بیشتر است.

نقش مهم پنجره‌ها در ساختمان‌ها این است که تهویه، روشنایی روز، افزایش گرمای خورشیدی و زیبایی را فراهم می‌کند. به‌طورکلی، خواص حرارتی و نوری یک پنجره را می‌توان برحسب پارامترهای کلیدی زیر ارائه کرد: ضریب انتقال حرارت[4]، ضریب دریافت حرارت خورشیدی و ضریب انتقال نور مرئی است. ارزیابی پارامترهای فوق توسط سه مکانیسم شناخته‌شده‌ی انتقال حرارت کنترل می‌شود: هدایت، همرفت و تابش. در این بخش به جزئیات پارامترهای کلیدی می‌پردازیم.

۱-۱-۲- ضریب انتقال حرارت

ضریب انتقال حرارت کل که به اصلاح U-value شناخته می‌شود، برای اندازه‌گیری اثربخشی به‌عنوان یک عایق استفاده می‌شود. واحد آن w/m^2k است و بر اساس انتقال حرارت هوا به هوا از طریق اجزای پنجره (شیشه، قاب، فاصله‌ی بین شیشه‌ها و فاصله دهنده‌ها) ارزیابی می‌شود. همان‌طور که در (جدول شماره ۲) مشاهده می‌شود، ادغام پنجره‌های کارآمد برای کاهش کل ضریب انتقال حرارت پوسته‌ی ساختمان، عملکرد انرژی ساختمان و راحتی ساکنان را بهبود می‌بخشد.

جدول ۲. میانگین U-value در اجزای ساختمان (Jelle et al., 2012).

جزء ساختمان	U-value (W/m²K)
زمین	۰/۲۵
سقف	۰/۱۶
دیوار خارجی	۰/۳۰
پنجره‌ها	۲/۰۰

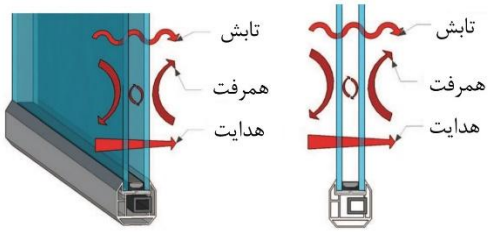
انتقال حرارت از طریق پنجره عمدتاً به دلیل هدایت گرما از طریق شیشه‌های پنجره است؛ بنابراین، همان‌طور که در (جدول شماره ۳) خلاصه‌شده است، انواع شیشه‌ها (یعنی پنجره‌های تک، دو یا سه جداره)، با و بدون پوشش کم

[1] Solar transmittance
[2] Visible reflectance
[3] Thermal transmittance coefficient
[4] U-value

گسیل و با یا بدون گاز آرگون بین شیشه‌ها، منجر به U-value های مختلف می‌شود. به‌غیراز شیشه‌های پنجره، حرارت می‌تواند از طریق جداکننده‌های پنجره و قاب‌ها نیز منتقل گردد. از سوی دیگر، همرفت و تابش به‌طور خاص در سه مکان در پنجره‌های چند جداره رخ می‌دهد: سطوح داخلی و خارجی پنجره‌ها و همچنین حفره‌های داخلی بین لایه‌های شیشه، همان‌طور که در (شکل شماره ۱) نشان داده‌شده است.

جدول ۳. مقادیر ضریب انتقال حرارتی در انواع مختلف پنجره (زمردیان و پوردیهمی، ۱۳۹۶).

نوع شیشه	گاز پرکننده	فاصله‌ی بین جداره‌ها (mm)	U-value (W/m²K)
تک جداره	-	-	۶/۳
تک جداره‌ی کم گسیل (e2=0.4)	-	-	۵
دوجداره	هوا	۶	۳/۴
	آرگون	۱۲	۲/۸
دوجداره‌ی کم گسیل (e2=0.04)	هوا	۶	۲/۷
سه جداره	هوا	۱۲	۲
سه جداره‌ی کم گسیل (e5=0.1)	آرگون	۱۲	۱/۳



شکل ۱. انتقال حرارت از طریق پنجره‌های دوجداره

۲-۱-۲- ضریب دریافت حرارت خورشیدی

SHGC که به‌عنوان G-value نیز توصیف می‌شود، انتقال انرژی درنتیجه‌ی تابش خورشید است که توسط انتقال انرژی خورشیدی جذب‌شده توسط مواد شیشه و انتشار مجدد به داخل تعیین می‌شود (Singh & Garg, 2010). این عامل برای تعیین قابلیت دریافت حرارت خورشید در زمان‌هایی که این اجزای شفاف در سایه هستند و توانایی جذب تابش با طول‌موج کوتاه رادارند (Olivieri et al., 2015) استفاده می‌شود. همچنین، برای کاهش بارهای گرمایشی در زمستان مهم است. مقادیر معمولی SHGC بین ۲۰ تا ۷۰ درصد است همان‌طور که در (جدول شماره ۴) ارائه‌شده است.

جدول ۴. تابش عبوری از شیشه‌های رنگی و ساده (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۵)

نوع شیشه	SHGC (%)
شیشه‌ی ساده	۷۸/۷
شیشه‌ی زرد	۶۲/۹
شیشه‌ی قرمز	۵۰/۵
شیشه‌ی سبز	۱۰/۶
شیشه‌ی آبی	۲۴/۲

۳-۱-۲- میزان عبور نور مرئی (Tv)

این ویژگی نوری شامل بخش مرئی طیف نور است که از یک شیشه عبور می‌کند. معمولاً از ۹۰ درصد برای شیشه‌ی شفاف (جدول شماره ۵) تا ۱۰ درصد برای شیشه‌های با پوشش بسیار بازتابنده متغیر است. این عامل با توجه به نوع شیشه، تعداد جدارها و وجود پوشش‌هایی که می‌تواند بر شفافیت تأثیر بگذارد، تعیین می‌شود (Cuce & Riffat, 2015). ضریب وضوح دید بالا به معنای حضور بیشتر نور روز در یک فضای معین و معمولاً کاهش بارهای روشنایی الکتریکی و گرمایش است. پنجره‌های دوجداره‌ی معمولی ضریب وضوح دید ۷۸٪ را نشان می‌دهند و اگر پوشش‌های کم گسیل (Solovyev et al., 2015) و فیلم‌های رنگی (EWC, 2015) در ترکیب آن گنجانده شوند، می‌توانند کاهش بیشتری نشان دهند.

جدول ۵. میزان عبور نور مرئی (کریم پور و همکاران، ۱۳۹۸)

نوع شیشه	ضخامت جداره‌ها (mm)	ضخامت گاز آرگون بین جداره‌ها (mm)	Tv (%)
تک جداره‌ی شفاف	۸	-	۸۹
سه جداره‌ی شفاف	۶-۴-۶	۸	۷۵
سه جداره‌ی کم گسیل	۶-۴-۶	۸	۷۱
سه جداره‌ی انعکاسی	۶-۴-۶	۸	۵۳

۳- روش تحقیق

در این تحقیق، ابتدا با بررسی مقالات معتبر فارسی و انگلیسی در پایگاه‌های معتبر، به دنبال مطالب مرتبط با موضوع پژوهش جستجو شد. برای مقالات فارسی، از پایگاه داده‌ی «سید» با جستجوی کلمات کلیدی شیشه، پنجره، انتقال حرارت و رفتار حرارتی، در گروه تخصصی هنر و معماری، در بازه زمانی ۱۳۵۸ تا ۱۴۰۲، استفاده گردید. درمجموع ۲۱۳ مقاله وجود داشت. با بررسی عناوین و چکیده‌های آن‌ها ۱۰ مقاله مرتبط با موضوع موردپژوهش و به‌صورت جزئی روی انواع شیشه‌ی پنجره‌ها کارکرده بودند. همچنین، برای مقالات انگلیسی از پایگاه "Google Scholar" استفاده شد و حدود ۱۵ مقاله‌ی به‌روز با بیشترین تشابه موضوعی جهت بررسی انتخاب شد.

این تحقیق باهدف ارائه راهنمایی‌های عملی و کاربردی برای افراد فعال در حوزه معماری و مهندسی ساختمان، به‌ویژه در زمینه استفاده از فناوری‌های نوین برای بهبود عملکرد شیشه‌ها در انتقال حرارت، انجام‌شده است. این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک منبع ارزشمند برای افرادی که در زمینه طراحی و اجرای ساختمان‌ها فعالیت می‌کنند، مفید واقع شود.

۴- بحث و یافته‌های پژوهش

به‌طورکلی سؤالات متعددی وجود دارد که در بین معماران بحث‌برانگیز شده است. چه مقدار نور از طریق شیشه عبور می‌کند؟ چه مقدار از پرتو مستقیم نور خورشید منتشر می‌شود؟ چه مقدار از گرمای تابشی خورشید از طریق شیشه منتقل می‌شود؟ چه مقدار گرمای هوا از شیشه عبور می‌کند؟ (Heschong, 1998). برای پاسخ به این سؤالات، شناسایی مفاهیم اولیه‌ی فیزیک و ویژگی‌های نور خورشید موردنیاز است.

۴-۱- فن‌آوری شیشه‌های ایستا

این بخش به بررسی فن‌آوری‌های شیشه‌ی ایستا یا سنتی می‌پردازد. در سال‌های اخیر، تحقیقات روی این نوع شیشه‌ها برافزایش عملکرد حرارتی و نوری متمرکز بوده است. انواع آن‌ها شامل شیشه‌های سیلیکونی[1]، پنجره‌های چند جداره، شیشه‌های چندلایه، پوشش‌های بازتابنده، پوشش‌های کم گسیل، فیلم‌های عایق[2] و پنجره‌های تحت خلأ است.

۴-۱-۱- ضخامت شیشه

برای یک پنجره‌ی تک جداره، همان‌طور که در (جدول شماره ۶). خلاصه‌شده است که مشخصات یک شیشه‌ی شفاف از یک کارخانه است، تأثیر ضخامت شیشه‌بر عملکرد حرارتی آن ارزیابی شد. کاهش قابل‌توجهی در ضریب انتقال حرارت در شیشه باضخامت‌های بالا مشاهده شد. بااین‌حال، کاهش در انتقال حرارت با کاهش در وضوح دید و افزایش وزن کلی پنجره همراه است.

جدول ۶. رابطه‌ی کلی ضخامت شیشه و انتقال حرارت
(Pilkington, 2024)

ضخامت (mm)	U-value (W/m·K)	G-value	T_V
۲/۰	۵/۸	۰/۸۹	۰/۹۱
۴/۰	۵/۸	۰/۸۷	۰/۹۰
۶/۰	۵/۷	۰/۸۲	۰/۸۸
۸/۰	۵/۶	۰/۸۰	۰/۸۷
۱۰/۰	۵/۶	۰/۷۷	۰/۸۷
۱۲/۰	۵/۵	۰/۷۴	۰/۸۵
۱۹/۰	۵/۳	۰/۶۶	۰/۸۱

۴-۱-۲- شیشه‌های چند جداره

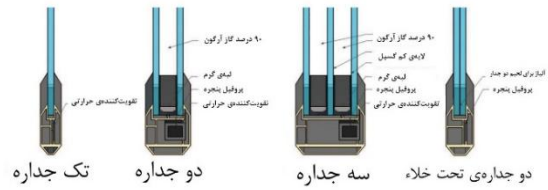
پنجره‌های دوجداره از ربع آخر قرن بیستم به‌طور گسترده در بریتانیا تولید می‌شدند (Li et al., 2017). آن‌ها می‌توانند مصرف انرژی در ساختمان‌ها را کاهش دهند و خواص عایق جدار شیشه‌ای را بهبود بخشند، زیرا شکاف بین شیشه‌ها به‌عنوان یک مانع حرارتی استفاده می‌شود (Aguilar et al., 2017). اهمیت مطالعه‌ی آگیولار در مدل‌سازی چهار پیکربندی مختلف از شیشه‌های دوجداره بر روی یک شکاف هوا (با استفاده از شیشه شفاف، جاذب، کم E و بازتابنده) نهفته است. این مطالعه نشان داد که شیشه انعکاسی می‌تواند تا ۷۲.۹ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند درحالی‌که

[1] SiO_4

[2] Suspended Film

دوره بازپرداخت متوسط ۸.۷۵ سال برای آب‌وهوای گرم و خشک دارد.

یک شکاف هوای واردشده بین شیشه‌های شیشه‌ای به‌عنوان لایه عایق حرارتی عمل می‌کند و باعث کاهش انتقال حرارت از طریق اجزای پنجره می‌شود (Aydin, 2000). این همچنین نشان‌دهنده کاهش ۵۰ درصدی تلفات حرارتی در مقایسه با تک جداره (Selkowitz, 2011) است، با مزیت حفظ ضریب انتقال مرئی و G-value در سطح نسبتاً بالا (EWC, 2015) (شکل شماره ۲). علاوه بر این، نرخ انتقال حرارت یک پنجره دوجداره ۲.۵ برابر کمتر از یک پنجره تک جداره است و ازاین‌رو افزایش حرارت را حدود ۵۰ تا ۶۷ درصد برای آب‌وهوای گرم کاهش می‌دهد (Arici & Karabay, 2010).



شکل ۲. اجزای شیشه‌بری پنجره‌های ایستا

۳-۱-۴- شیشه‌های رنگی

شیشه‌های رنگی شفافیت دید داخل به خارج را حفظ می‌کند و بخشی از گرمای خورشید را جذب، درعین‌حال بخشی از نور روز را مسدود می‌کند (Li et al., 2015). رنگ شیشه در مرحله‌ی افزودن اجزای فلزی بر روی شیشه در طول فرآیند ساخت شیشه پدید می‌آید. این فرآیند عبور نور، دید و رنگ را کاهش می‌دهد (Rezaei et al., 2015)، حداکثر ۵۰ درصد انرژی خورشید در شیشه تک جداره جذب می‌شود (EWC, 2015) و به‌طور مؤثر تابش نور خورشید را کاهش می‌دهد.

این خاصیت جذب روی شیشه را می‌توان بر اساس گزینش مشخصات شیشه‌ی رنگی تنظیم کرد، به این معنی که شیشه‌ی رنگی می‌تواند طیف خورشیدی نزدیک به مادون‌قرمز را جذب کند درحالی‌که نور روز را منتقل می‌کند (جدول شماره ۷). شیشه‌های رنگی موجود در بازار را بر اساس رنگ و ضخامت آن‌ها با سطح مربوطه از شفافیت، عایق و ضرایب افزایش حرارت خلاصه می‌کند (Rezaei et al., 2015).

جدول ۷. مشخصات شیشه‌های رنگی برای رنگ‌ها و ضخامت‌های مختلف (Rezaei et al., 2017).

رنگ	ضخامت (mm)	U-value (W/m^2K)	G-value	T_V
برنز	۴	۵/۸	۰/۶۸	۰/۶۰
	۶	۵/۷	۰/۶۰	۰/۴۹
	۸	۵/۶	۰/۵۳	۰/۴۰
	۱۰	۵/۶	۰/۴۸	۰/۳۳
سبز	۴	۵/۸	۰/۶۳	۰/۷۹
	۶	۵/۷	۰/۵۵	۰/۷۳
	۸	۵/۶	۰/۵۰	۰/۶۸
	۱۰	۵/۶	۰/۴۶	۰/۶۳
خاکستری	۴	۵/۸	۰/۶۶	۰/۵۵
	۶	۵/۷	۰/۵۷	۰/۴۳
	۸	۵/۶	۰/۵۰	۰/۳۴
	۱۰	۵/۶	۰/۴۵	۰/۲۶

۴-۱-۴- پوشش‌های کم گسیل

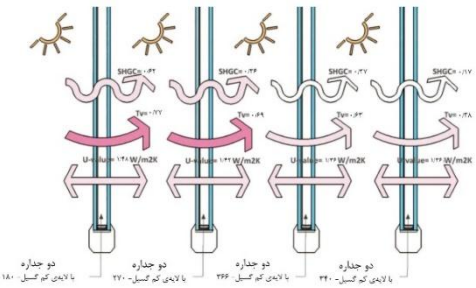
مانند یک آینه‌ی حرارتی، سطح کم گسیل امواج مادون‌قرمز با طول‌موج بلند را منعکس می‌کند. هنگامی‌که در سطح داخلی پنجره اعمال می‌شود، شیشه اجازه می‌دهد نور مرئی و مادون‌قرمز از پنجره عبور کند. پوشش کم گسیل، امواج مادون‌قرمز (انرژی گرمایی) داخلی را منعکس می‌کند و آن را به فضای داخلی بازمی‌گرداند. درنتیجه انتقال حرارت بین محیط داخلی و خارجی کاهش‌یافته و خاصیت عایق بودن پنجره بهبود می‌یابد.

شیشه‌ی پوشش داده‌شده با مواد کم گسیل (Low-E) یک پوشش شفاف نازک ساخته‌شده از اکسید فلزی مانند قلع، نقره یا روی برای کاهش انتشار سطوح شیشه‌ای تولید می‌شود (Mempouo et al., 2010). تولید مصنوعی پوشش‌های کم گسیل شامل روش‌های: ۱- پراکنده و ۲- پیرولیتیک است (EWC, 2015). روش اول شامل پوشش‌های چندلایه فلز (معمولاً نقره)، اکسید یا نیترید است که توسط کندو پاش فیزیکی بخار رسوب می‌کنند که معمولاً به‌عنوان «لایه کم گسیل» شناخته می‌شود. در همین حال،

فناوری پیرولیتیک شامل فیلم اکسید قلع است که در حالت مذاب به شیشه چسبانده می‌شود، در فرآیندی به نام رسوب مذاب شیمیایی یا «پوشش سخت کم گسیل» که منجر به پوشش‌های ضخیم‌تر از پوشش نرم کم گسیل می‌شود.

پوشش سخت کم گسیل ۱۳ تا ۱۷ درصد صرفه‌جویی و پوشش نرم کم گسیل ۸ تا ۱۰ درصد صرفه‌جویی کلی انرژی برای بارهای گرمایشی و سرمایشی را طبق مطالعه‌ی مسکن‌های کانادایی گزارش‌شده است (Laouadi et al., 2008). طبق تحقیقات قبلی، در نظر گرفتن پوشش‌های سخت کم گسیل منجر به بهبود عملکرد انرژی در خانه‌های بریتانیا می‌شود.

مانند شیشه‌های رنگی، پوشش‌های کم گسیل را می‌توان برای طیف‌های انرژی و طول‌موج‌های خاص به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد سرمایش، گرمایش و نور روز طراحی کرد. نقطه‌ضعفی که توسط پوشش‌های کم گسیل (Zhang et al., 2019) ارائه می‌شود این است که می‌توانند افزایش جذب حرارت خورشیدی را برای جبران بارهای گرمایشی موجود کاهش دهند (Kumar et al., 2019). بااین‌وجود، کاهش سودمند تابش خیره‌کننده و کنترل خیرگی، این پوشش‌ها را به‌عنوان گزینه‌ای برای بهینه‌سازی انتشار و کنترل تشعشع، همان‌طور که در (شکل شماره ۳) خلاصه‌شده است، قرار می‌دهد.



شکل ۳. انتقال حرارت (U-value)، SHGC، Tv
(Cardinal, 2024)

۵-۱-۴- گازهای جایگزین

طیف گسترده‌ای از گازها برای صنعت شیشه‌ی چند جداره برای پر کردن شکاف بین جداره‌های شیشه استفاده می‌شود (Laouadi et al., 2008). گازهای نجیب (بی‌اثر) به دلیل مقاومت در برابر انتقال گرما و در دسترس بودن در طبیعت، به‌طور گسترده توسط شرکت‌های پنجره سازی استفاده می‌شود. گاز زنون کارآمدترین گاز است، اما کمیاب بودن مواد، ساخت آن را گران می‌کند، درحالی‌که گاز کریپتون (U-value = 0.64 W/m²K) به دلیل عملکرد بهبودیافته، کاربرد نسبتاً متوسط، اما قیمت بالاتری در مقایسه با آرگون دارند (Jelle et al., 2008). برای پنجره‌های عایق با گاز چند جداره، ماژول‌های دوجداره و سه جداره می‌توانند به ترتیب به مقادیر ضریب انتقال حرارت از ۲/۸ تا ۲/۴ و ۲ تا ۱/۵ وات بر مترمربع درجه کلوین دست یابند (شاعری و همکاران، ۱۳۹۷)، خلاصه‌ای جامع از این فناوری‌ها را می‌توان در (جدول شماره ۸) مشاهده کرد.

جدول ۸. رابطه‌ی کلی انتقال حرارت و دید شیشه‌های دو و سه جداره پرشده با گازهای نجیب (شاعری و همکاران، ۱۳۹۷).

لایه‌ها (از بیرون به داخل)	U-value (W/m·K)	G-value	T_V
شیشه شفاف (۳mm) هوا (۱۰mm) شیشه شفاف (۳mm)	۲/۸۱۱	۰/۷۴۸	۰/۸۹۷
شیشه شفاف (۳mm) آرگون (۱۰mm) شیشه شفاف (۳mm)	۲/۶	۰/۷۴۲	۰/۸۰۱
شیشه شفاف (۳mm) کریپتون (۱۰mm) شیشه شفاف (۳mm)	۲/۴۷۸	۰/۷۴۳	۰/۸۰۱
شیشه شفاف (۳mm) زنون (۱۰mm) شیشه شفاف (۳mm)	۲/۴۵	۰/۷۴۴	۰/۸۰۱
شیشه شفاف (۳mm) زنون (۶mm) شیشه شفاف (۳mm) آرگون (۶mm) شیشه شفاف (۳mm)	۲/۰۴۹	۰/۶۸۱	۰/۷۳۸
شیشه شفاف (۳mm) هوا (۶mm) شیشه شفاف (۳mm) کریپتون (۶mm) شیشه شفاف (۳mm)	۱/۸۸	۰/۶۷۹	۰/۷۳۸
شیشه شفاف (۳mm) هوا (۶mm) شیشه شفاف (۳mm)	۱/۷۹۵	۰/۶۷۸	۰/۷۳۸

لایه‌ها (از بیرون به داخل)	U-value (W/m·K)	G-value	T_V
زنون (۶mm) شیشه شفاف (۳mm)			
شیشه شفاف (۳mm) آرگون (۶mm) شیشه شفاف (۳mm) کریپتون (۶mm) شیشه شفاف (۳mm)	۱/۷۸۱	۰/۶۸۲	۰/۷۳۸

آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌های قبلی ثابت کرده‌اند که پنجره‌های پر از آرگون می‌توانند رسانایی پنجره را تا ۶۷ درصد در مقایسه با مخلوط‌های مبتنی بر هوا کاهش دهند (Andresen, 2016). خواص بی‌بو و غیر سمی آن‌ها، ترکیب این فناوری‌ها را در خانه‌های مسکونی در مناطق سردتر ممکن کرده است (NSG-Group, 2017). پر کردن جدار با کریپتون ارزش کلی ضریب انتقال حرارت را ۱۷/۱۸ درصد در مقایسه‌های نظری با آرگون کاهش می‌دهد، اگرچه هزینه‌ی تولید بالاتر آن، آرگون را به‌عنوان گزینه‌ای مناسب‌تر برای تولید انبوه قرار داده است. از طرف دیگر، گاز پرکننده زنون به‌عنوان یک ماده عایق آزمایش‌شده است و کمترین U-value را از همه آن‌ها گزارش می‌کند (حدود ۰/۲۸ وات بر مترمربع کلوین)، اگرچه این عنصر با آینده‌ای مشابه با کریپتون مواجه است و هزینه‌های ساخت گران‌تری از فن‌آوری‌های آرگون یا کریپتون دارد (Cuce & Riffat, 2015).

پنجره‌های چندلایه اخیراً به‌عنوان یک فناوری مناسب برای جایگزینی شیشه‌ی پنجره در ساختمان‌های تاریخی و قدیمی دیده می‌شوند که نیاز واقعی به یک‌راه حل نازک و سبک‌وزن دارند. این‌یک راه‌حل قابل‌قبول، غیرقابل تجزیه و باریک ازنظر زیست‌محیطی است که به‌ندرت در طول چرخه‌ی عمر خود تراکم نامعقول گاز در جدار میانی را نشان می‌دهد (Selkowitz, 2011).

۶-۱-۴- شیشه‌های تحت خلأ

استفاده از شیشه‌ی تحت خلأ یک‌راه حل بسیار امیدوارکننده برای کاهش انتقال حرارت از طریق هدایت هوا و همرفت در جدار تخلیه‌شده در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا تعداد ذرات گاز مسئول انتقال حرارت در شکاف بین دو جدار شیشه تخلیه‌شده است.

امروزه، صنعت تولید به دنبال توسعه شیشه‌های تخلیه‌شده (Fang & Arya, 2019- Zhange et al., 2017) است که می‌تواند با کاهش رسانش گرما از طریق قطعه‌های نگه‌دارنده[1]، مقدار ضریب انتقال حرارت کمتری را گزارش کند. پنجره‌های خلأ تجاری موجود می‌توانند به مقادیر ضریب انتقال حرارت تا ۰/۷ وات بر مترمربع کلوین دست یابند (همان‌طور که در جدول شماره ۹ آمده است).

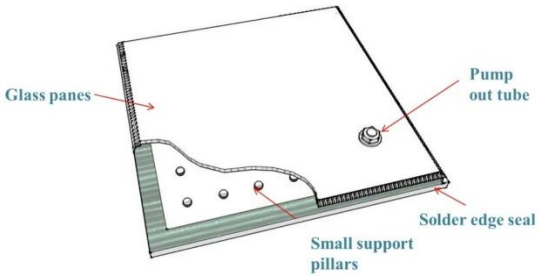
جدول ۹. مقایسه‌ی پنجره‌های تحت خلأ موجود در بازار (NSG-Group, 2017).

نام	توضیح	ضخامت (mm)	U-value (W/m^2K)	G-value (mm)	T_V
Pilkington Spacia (double glazing)	قطعه‌های نگهدارنده ۲ mm ی	۶/۲	۱/۴	۰/۶۶	/۷۶ ۰
Pilkington Spacia Shizuka (double g.)	شیشه‌ی لمینت شده	۹/۲	۱/۴	۰/۶۱	/۷۳ ۰
Pilkington Spacia Shizuka Cool (double g.)	لایه‌ی داخلی آرگون و یک‌لایه کم گسیل	۶/۲	۱/۰	۰/۴۹	۰/۷
Pilkington Spacia2 1 thermal control (triple g.)	لایه‌ی داخلی کریپتون و دولایه کم گسیل	۱۸/۲	۰/۹	۰/۵۸	/۶۴ ۰

[1] Support pillars

Pilkington Spacia2 1 solar control (triple g.)	لایه‌ی داخلی آرگون و دولایه کم گسیل	۱۸/۲	۰/۷	۰/۴۶	/۵۹ ۰

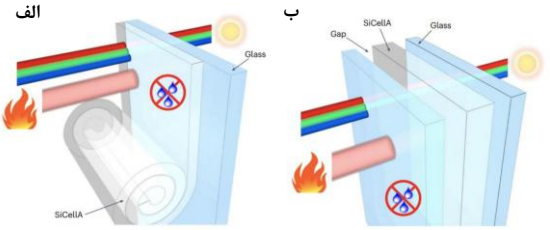
انتقال حرارت در شیشه‌ی تحت خلأ با تماس سری قطعه‌های نگه‌دارنده و آب‌بندی لبه[1] به‌وسیله رسانایی (هدایت) صورت می‌گیرد (شکل شماره ۴)؛ بنابراین، روش‌هایی برای مواد جدید در این اجزا به‌منظور کاهش این مقادیر ضریب انتقال حرارت در پنجره آزمایش می‌شوند (Cuce & Cuce, 2016).



شکل ۴. شیشه‌ی تحت خلأ (Ghosh&Norton, 2018)

ایروژل یک ماده بسیار عایق است که در اوایل سال ۱۹۳۰ کشف شد (Kistler, 1931). این ماده بر پایه سیلیس است که از ۴٪ سیلیس و ۹۶٪ هوا تشکیل‌شده است. این ماده یک ساختار مولکولی فوم مانند دارد که هوا را به دام می‌اندازد و از انتقال همرفت گرما جلوگیری می‌کند و درعین‌حال اجازه‌ی عبور نوربالا را می‌دهد. استفاده از این ماده در صنعت پنجره ثابت کرده است که انتقال حرارت از طریق رسانایی را کاهش می‌دهد و تنها در خواص مواد به مقادیر انتقال حرارت تا ۰/۰۵ وات بر مترمربع کلوین (EWC, 2015) می‌رسد (Qiu et al., 2019). همان‌طور که در (شکل ۵) می‌بینید این لایه می‌تواند روی شیشه یا بین دو جدار شیشه قرار گیرد.

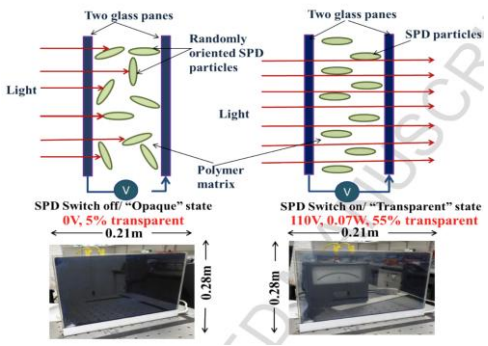
[1] Solder edge seal



شکل ۵. شیشه‌ی ایروژل، الف- تک جداره، ب- دوجداره (Abraham et al., 2023)

۲-۴- فن‌آوری شیشه‌های پویا

مفهوم پنجره یا شیشه‌ی پویا شامل قطعه شیشه‌هایی است که قسمت‌های متحرک یا متغیر را برای سایه‌اندازی و ذخیره‌ی انرژی یکپارچه می‌کند. این شامل خواص نوری و حرارتی متغیر است که در بیشتر موارد به آب‌وهوا وابسته است. برخی از نمونه‌های این فناوری‌ها عبارت‌اند از: الکتروکرومیک (شکل شماره ۶) و فتوکرومیک (Wu et al., 2017)، ترموکرومیک، گازوکرومیک، مواد تغییر فاز دهنده و پنل‌های فتوولتائیک (EWC, 2015- Kamalisarvestani et al., 2013). (جدول شماره ۱۰) خصوصیات و ویژگی‌های برخی از پنجره‌های شیشه‌ای پویا را خلاصه می‌کند.



شکل ۶. تغییر حالت شیشه‌ی الکتروکرومیک (Ghosh&Norton, 2018)

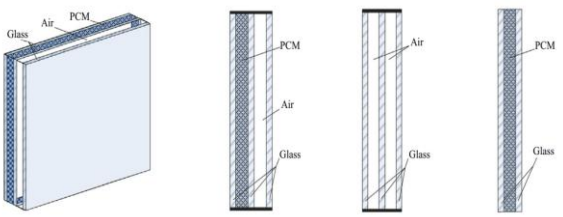
جدول ۱۰. خلاصه‌ای از ویژگی‌های پنجره‌های الکتروکرومیک، فتوکرومیک، ترموکرومیک و گازوکرومیک (NSG-Group, 2017)

نوع	توضیح	U-value (W/m·K)	G-value (SHGC)	Tv
الکتروکرومیک	برای حفظ حالت شفاف به	۰/۸۶	کنترل پویا	کاهش در پاسخ

نوع	توضیح	U-value (W/m²K)	G-value (SHGC)	Tv
	انرژی ثابت نیاز دارد.			به تغییرات الکتریکی
فتوکرومیک	نور خورشید را در پاسخ به نور محیط مسدود می‌کند.	۱/۵۸- ۵/۳	هنگامی‌که SHGC < ۰/۷۸ تیره می‌شود.	کاهش در پاسخ به افزایش نور
ترموکرومیک	لایه‌ی پلیمری دارد.	-	-	کاهش در دماهای بالاتر
گازوکرومیک	شفافیت در تغییرات دما را تنظیم می‌کند.	-	-	کاهش ۵ تا ۶ درصد

۴-۲-۱- پنجره‌های تغییرفازدهنده[1]

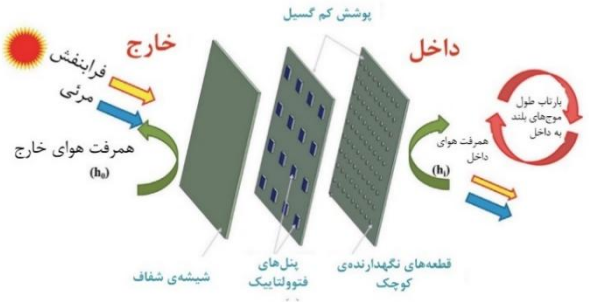
مواد تغییر فاز دهنده موادی هستند که می‌توانند انرژی را از مواد اطراف جذب کرده و با تأخیر آزاد کنند. استفاده از آن‌ها در کاهش انتقال حرارت در پنجره‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند همان‌طور که در ساختار آن در (شکل شماره ۷) توضیح داده‌شده است، این مواد گرمای جذب‌شده را صرف تغییر حالت از جامد به مایع می‌کنند و مانع از انتقال حرارت به محیط اطراف می‌شوند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که پنجره‌ی دوجداره با پر کردن مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند به کاهش گرمای خورشیدی در ساختمان‌ها کمک کند درحالی‌که دمای سطح داخلی پنجره را تا ۳ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش می‌دهد (Li et al., 2016).



شکل ۷. مقایسه‌ی ساختار سه نوع پنجره با مواد تغییر فاز دهنده (Li et al.,2016)

۴-۲-۲- پنجره‌های تلفیق‌شده با پنل فتوولتاییک[2]

پنجره‌های دارای پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی با چالش حفظ بازده برق بالا، بدون اینکه انتقال حرارت زیاد شیشه آن را به خطر بیندازند، مواجه هستند (Meng et al., 2018)؛ بنابراین، بیشتر پیشرفت‌های جدید در شیشه‌های فتوولتاییک به سلول‌های فتوولتاییک نیمه شفاف محدود می‌شود (شکل شماره ۸). سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ[3] مواد رسانایی هستند که شامل یک‌لایه دی‌اکسید تیتانیوم است و می‌تواند به متوسط بازده انرژی ۱۶ تا ۲۰ درصد برسد (Skandalos & Karamanis, 2018). فناوری‌های اخیر در پنجره‌ها باهدف بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برای تبدیل برق، به گزینه‌ای جذاب برای اثرات زیست‌محیطی کمتر، کاهش هزینه و استفاده مؤثر از زمین هستند.

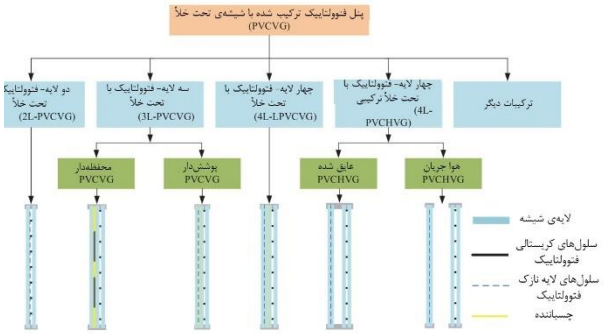


شکل ۸. ساختار و انتقال حرارت شیشه‌های تلفیق‌شده با سلول‌های فتوولتاییک (Uddin et al., 2023)

از محبوب‌ترین شیشه‌های دارای سلول فتوولتاییک، شیشه‌های فتوولتاییک ترکیب‌شده با شیشه‌های تحت خلأ[4] است. این شیشه‌ها را می‌توان بر اساس نحوه‌ی اتصال شیشه فتوولتاییک و تعداد شیشه‌های استفاده‌شده در ساخت آن به گروه‌های مختلفی تقسیم کرد. اولین پیکربندی یک PVCVG دولایه (2L-PVCVG) است که در آن‌یک شیشه فتوولتاییک تک جداره و یک ورق تک شیشه به‌عنوان شیشه‌ی تحت خلأ ساخته‌شده است. PVCVG سه لایه (3L-PVCVG) پیکربندی دیگری است که در آن‌یک شیشه‌ی

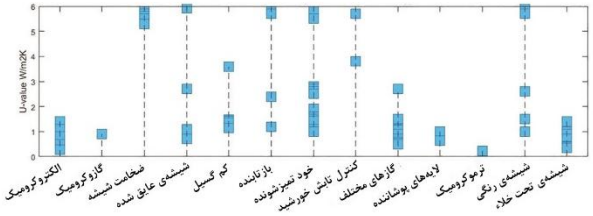
[1] PCM windows
[2] PV integrated windows
[3] Dye-sensitised solar cells (DSSC)
[4] Photovoltaic Combined Vacum Glazing (PVCVG)

دوجداره‌ی تحت خلأ با یک شیشه‌ی فتوولتاییک تک جداره (3LLPVCVG) یا یک سلول فتوولتاییک محفظه دار بین شیشه‌ی تحت خلأ و شیشه‌ی تک جداره چسبیده شده است (3L-EPVCVG). در پیکربندی‌های دیگر، شیشه‌ی دوجداره‌ی فتوولتاییک با شیشه‌ی تحت خلأ ترکیب می‌شود (4L-LPVCVG). آخرین پیکربندی که از پنجره‌ی هوا جریان بین شیشه‌ی تحت خلأ و فتوولتاییک دوجداره استفاده می‌کند، شیشه خلأ ترکیبی فتوولتائیک (PVCHVG) نامیده می‌شود. همچنین ۴ لایه PVCVG است و می‌تواند بدون تهویه یا عایق (I-PVCHVG) نیز باشند. طبقه‌بندی PVCVG ها (در شکل شماره ۹) ارائه‌شده است.



شکل ۹. طبقه‌بندی فتوولتاییک‌های ترکیب‌شده با شیشه‌ی تحت خلأ (Uddin et al.,2023)

ساخت پنجره‌های کم‌مصرف بر اساس کدهای انرژی محلی نیازمند بهبود فاکتورهای U-value در تمامی واحدهای شیشه‌ی خارجی و همچنین کاهش هزینه، وزن و ابعاد است. درنهایت، یک نمودار خلاصه بر اساس فن‌آوری‌های شیشه‌ی موجود در بازار در (شکل شماره ۱۰) ارائه‌شده است که بر روی مقادیر ضریب انتقال حرارت بر اساس داده‌های ارائه‌شده توسط شرکت‌های بزرگ بین‌المللی پنجره تمرکز دارد. کاهش قابل‌توجهی که با جایگزینی گازهای مختلف، شیشه‌های الکتروکرومیک و خلأ به دست می‌آید قابل‌توجه است و عمدتاً ناشی از تلاش آن‌ها برای کاهش انتقال حرارت توسط رسانش و تشعشع در شیشه است.



شکل ۱۰. مقایسه میانگین ضریب انتقال حرارت بر اساس گزارش‌های تجاری منتشرشده (IQ Glass,2017 - NSG-Group, 2017)

۵- جمع‌بندی و پیشنهادها

این بررسی شامل یک مطالعه دقیق از شیشه‌های پنجره تجاری موجود است که بر اساس انتقال حرارت پنجره و انتقال نور مرئی ارزیابی‌شده‌اند. از بررسی مقالات، موارد زیر نتیجه گرفته می‌شود:

- اتلاف انرژی از طریق پوسته‌ی ساختمان به‌طور مستقیم با تعامل سطوح بیرونی با محیط مرتبط است. تحقیقات فعلی و آتی بر کاهش انتقال حرارت بر روی عناصر شیشه‌ای با استفاده از فناوری‌های ایستا و پویا متمرکز است.

- افزایش ضخامت شیشه‌ی پنجره تأثیر کمی در کاهش U-value پنجره‌ها دارد و از طرفی باعث سنگین و حجیم شدن ساختمان می‌شود. پنجره‌های رنگی تأثیر مشابهی بر انتقال گرما دارند و تنها بر روی انتقال نور مرئی و ضریب انتقال حرارت خورشید تأثیر می‌گذارد.

- پوشش‌های پنجره راه‌حل‌های مؤثری برای کاهش تأثیر SHGC در ساختمان‌ها هستند. استفاده از پوشش‌های کم گسیل و انعکاسی می‌تواند فاکتور SHGC را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.

-فاصله‌ی بین دو جدار شیشه می‌تواند از گاز پر شود که مقدار انتقال حرارت را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد.

- شیشه‌های چند جداره می‌توانند انتقال حرارت را در پنجره‌ها به میزان قابل‌توجهی کاهش دهند.

-شیشه‌ی تحت خلأ راه‌حلی با کارایی بالا برای کاهش انتقال حرارت روی پنجره‌ها ارائه می‌دهد.

- به‌طورکلی، این مطالعه نشان می‌دهد که انتقال حرارت و نور مرئی از طریق پنجره‌ها می‌تواند با استفاده از فناوری‌های مدرن بهبود یابد و به کاهش اتلاف انرژی و افزایش کارایی ساختمان کمک کند.

- ساخت پنل‌های فتوولتائیک یکپارچه با شیشه راه‌حلی امیدوارکننده و جذاب برای تولید انرژی است که تأثیرات کمتری بر چرخه‌ی عمر پنجره و افزایش بازده خروجی آن دارد.

- از این بررسی، نتیجه می‌گیریم که فناوری‌های شیشه‌ی تحت خلأ با کاربردهای ایروژل می‌توانند در سال‌های آینده در بازار ظاهر شوند و در کنار آن چالش‌های مربوط به استحکام و پایداری مواد برطرف شوند. به‌طور مشابه، استفاده از پنل‌های فتوولتاییک نیمه شفاف که در نمونه‌های اولیه پنجره‌ها ادغام‌شده‌اند، ممکن است به‌عنوان روشی برای دستیابی به ساختمان‌های کربن خالص صفر برای شیشه‌ی پنجره‌های آینده در نظر گرفته شود.

۱-۵- پیشنهادها و محدودیت‌های پژوهش

- مقالات مروری بیشتری می‌توانند در این حوزه گردآوری شوند و دید جامع‌تری ازلحاظ مصالح به‌کاررفته در شیشه‌ها و پوشش‌ها را داشته باشند.

- با توجه به اقلیم‌های ایران، پژوهش‌های آتی می‌توانند شبیه‌سازی‌هایی با استفاده از این شیشه‌های با عملکرد بالا داشته باشند.

- پژوهش‌های آینده بهتر است از نمونه‌های واقعی تحت آزمایش با دستگاه‌های اندازه‌گیری باشند تا نتایج اعلام‌شده به‌درستی اثبات شوند.

۶- منابع

- پیله‌چی‌ها، پیمان؛ بیات، محسن؛ قاسمی نسب، مریم. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر کارایی انرژی پنجره‌های دوجداره در اقلیم گرم و خشک (مطالعه موردی: جبهه جنوبی ساختمان اداری در شهر تهران). *هویت شهر*. ۱۵(۴۷)، ۱۴-۵.

10.30495/hoviatshahr.2021.16498

- حق‌شناس، محمد؛ بمانیان، محمدرضا؛قیابکلو، زهرا. (۱۳۸۷). بررسی تأثیر شیشه‌های رنگی بر میزان نور و انرژی عبوری در محدوده‌ی مرئی. *علوم و فناوری رنگ*. ۱۰، ۲۲۰-۲۱۳.

https://20.1001.1.17358779.1387.2.4.1.1

- عسگری انارکی، احمد، حیدری، شاهین و کاری، بهروز محمد. (۱۳۹۸). نمای خورشیدی مدولار با مقاومت حرارتی بالا. *نشریه هنرهای زیبا، معماری و شهرسازی*،۲۴(۳)، ۸۶-۷۷.

https:// 10.22059/jfaup.2020.126695.671172

- زمردیان، زهراسادات و پوردیهیمی، شهرام. (۱۳۹۶). ارزیابی عملکرد حرارتی و بصری پنجره در کلاسهای درس در اقلیم شهر تهران. *صفه*،۲۷(۳)، ۲۴-۵.

https://dorl.net/dor/20.1001.1.1683870.1396.27.3.1.5

- شاعری، جلیل؛ وکیلی نژاد، رزا؛ یعقوبی، محمود. (۱۳۹۸). تأثیر نوع گازهای میانی پنجره‌های دو و سه جداره بر بار سرمایش و گرمایش ساختمان‌های اداری در اقلیم گرم و مرطوب، گرم و خشک و سرد ایران. *معماری و شهرسازی ایران*، ۱۰ (۱۸)، ۲۲۵-۲۱۱.

https://doi.org/10.30475/isau.2020.103683

- کریم پور، علیرضا؛ دیبا، داراب و اعتصام، ایرج. (۱۳۹۸). تحلیل‌های اقتصادی و ارزیابی میزان مصرف انرژی بر اساس نوع و نسبت پنجره‌ها با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی (مطالعه موردی: یک واحد مسکونی نمونه در شهر تهران). *هویت شهر*، ۱۳(۳۹)، ۳۴-۱۹.

https://scj.sbu.ac.ir/article_100414.html
10.22034/jest.2021.40167.4482

- محمد کاری، بهروز؛ حیدری، شاهین و آب روش، مهدیه. (۱۳۹۵). ارزیابی فنی اقتصادی کاربرد پوشش کم گسیل در جدارهای نور گذر ساختمان. *هنرهای زیبا*. ۴(۲۱)، ۱۶-۵.

https://scj.sbu.ac.ir/article_100414.html
10.22059/jfaup.2017.61652

- نمازیان، علی، و سپهری، یحیی. (۱۳۹۴).نقش شیشه (پنجره) در رفتار حرارتی ساختمان. *مسکن و محیط روستا*. ۱۵۲، ۱۰۰-۸۵.

doubleglazed windows for the climatic regions of Turkey. *Energ Build*, 42, 1773–8.

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.013

- AŞIKOĞLU, R. A. D. A. (2024). Determination of the Effect of Different Window Parameters Windows on Energy Consumption in Buildings by Design of Experiment. *Online Journal of Art and Design*, 12.

https://scj.sbu.ac.ir/article_100414.html
1211.pdf (adjournal.net)

- Aydin, O. (2000). Determination of optimum airlayer thickness in double-pane windows. *Energ Build*, 32 (3), 303–8.

https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00057-8

- Buratti, C., Belloni, E., Merli, F., & Zinzi, M. (2020). Aerogel glazing systems for building applications: A review. (2021). *Energy & Buildings*, 231.

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110587

- Cuce, E., Cuce, PM. (2016). Vacuum glazing for highly insulating windows: Recent developments and future prospects. *Renew Sust Energ Rev*, 54, 1345–57.

https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.134

- Cuce, E., & Riffat, Saffa B. (2015). A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 695-714.

http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.084

- EWC, E. W. C. o. M. a. L. B. N. L. (2015). Windows for high-performance commercial buildings.

http://www.commercialwindows.org/vt.php.

- Fang, Y., & Arya F. (2019). Evacuated glazing with tempered glass. *Sol Energ*, 183, 240–7.

https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz032

- Ghosh, A., & Norton, B. (2018) Advances in switchable and highly insulating autonomous (self-powered) glazing systems for adaptive low energy buildings. *Renewable Energy*, 1003-1031

https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.038

https://jhre.ir/browse.php?a_code=A-۱۰-۱۶۶۴-۱&slc_lang=fa&sid=۱

- وهابی، ویدا، و مهدوی‌نیا، مجتبی. (۱۳۹۵). تأثیر ویژگی‌های کالبدی پوشش‌های محافظ پنجره بر عملکرد حرارتی ساختمان‌های مسکونی شهر تهران. *معماری و شهرسازی ایران*، ۷۵-۹۰.

https://doi.org/10.30475/isau.2018.68581

- Abdelhafez, M. H. H., Aldersoni, A. A., Gomaa, M. M., Noaime, E., Alnaim, M. M., Alghaseb, M., & Ragab, A. (2023). Investigating the Thermal and Energy Performance of Advanced Glazing Systems in the Context of Hail City, KSA. *Buildings*, 13.

https://doi.org/10.3390/buildings13030752

- Abraham, E., Cherpak, V., Senyuk, B., ten Hove, J. B., Lee, T., Liu, Q., & Smalyukh, I. I. (2023). Highly transparent silanized cellulose aerogels for boosting energy efficiency of glazing in buildings. *Nature Energy*, 8, 381-396.

https://doi.org/10.1038/s41560-023-01226-7

- Abu-Jdayil, B., Mourad, A.-H., W. Hittini, M. Hassan, & Hameedi, S. (2019). state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials. an overview. *Construct Build Mater*. 214, 709–735.

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102

- Aguilar, J., Xamán, J., Olazo, Y., Hernández-López, I., Becerra, G., & Jaramillo, O.A. (2017). Thermal performance of a room with a double glazing window using glazing available in Mexican market. *Appl Therm Eng*, 119, 505–15.

https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.083

- Alrashed, F., & Asif, M. (2015). Analysis of critical climate related factors for the application of zero-energy homes in Saudi Arabia. Renew. Sustain. *Energy Rev*, 41, 1395-1403.

https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.031

- Arici, M., & Karabay, H. (2010). Determination of optimum thickness of

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111022

- Kistler, S.S. (1931). Coherent expanded aerogels and jellies. *Nature*, 127, 741.

https://doi.org/10.1038/127741a0

- Kumar G, k., Saboor, S., Kumar, V., Kim, K. H & Babu T. P, A. (2018). Experimental and theoretical studies of various solar control window glasses for the reduction of cooling and heating loads in buildings across different climatic regions. *Energ and Building*, 173, 326–336.

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.054

- Landuyt, L., De Turck, S., Laverge, J., Steeman, M., & Van Den Bossche, N. (2021). Balancing environmental impact, energy use and thermal comfort: Optimizing insulation levels for The Mobble with standard HVAC and personal comfort systems. *Building and Environment*, 206, 108307,

https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108307

- Laouadi, A., Galasiu, A., Swinton, M. C., Armstrong, M., Marchand, R.G., Arsenault, C., & Szadkowski, F. (2008). Field Performance of Exterior Solar Shadings for Residential Windows: Winter Results. Proceedings the 5th IBPSA Canada Conference, Quebec City, 1-8.

http://lois.justice.gc.ca/fr/showtdm/cs/C-42

- Li, C., Tan, J., Chow, T., & Qiu, Zh. (2015). Experimental and theoretical study on the effect of window films on building energy consumption. *Energ and Buildings*, 102, 129–38.

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.025

- Li, D., Wu, Y., Wang, B., Liu, C., & Arici, M. (2020). Optical and thermal performance of glazing units containing PCM in buildings: A review. *Construction and Building Materials*, 233, 117327,

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117327

- Li, N., Meng, Q., Zhao, L., Li, H., Wang, J., Zhang, N., Wang, p., & Lu, S. (2023). Thermal performance study of multiple thermal insulating glazings with polycarbonate films as interval

- Ghoshal, S., & Neogi, S. (2014). Advance Glazing System – Energy Efficiency Approach for Buildings a Review. *Energy Procedia*, 54, 352-358.

https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.278

- Guo, W., Liu, G., Zhang, K., Jin, Y., & Arıcı, M. (2023). Thermal performance investigation of greenhouse glazing units containing PCM with different thermophysical and optical properties. *Buildings*, 13(7), 1715.

https://doi.org/10.3390/buildings13071715

- Heschong, L., & Resources, E. D. (1998). Skylighting Guidelines. Southern California Edison.

https://www.sce.com/

- Huang, Y., Mankibi, M., Cantin, R., & Coillot, M. (2021). Application of fluid and promising material as advanced inter-pane medium in multi glazing windows for thermal and energy performance improvement: A review. *Energy and Buildings*,253.

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111458

- Anh, L.H., & Pásztory, Z. (2021). An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of building engineering*, 44.

https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102604

- Jelle, B.P., Hynd, A., Gustavsen, A., Arasteh, D., Goudey, H., & Hart, R., (2012). Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 96, 1–28.

https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.08.010

- Jin, Q. & Overend, M. (2016). A comparative study on highperformance glazing for office buildings. *Intelligent Buildings International*, 9(4), 181–203.

http://dx.doi.org/10.1080/17508975.2015.1130681

- Khaled, K. & Berardi, U. (2021). Current and future coating technologies for architectural glazing applications. *Energy & Buildings*, 244, 111022.

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.056

- Orouji, P., Vakili, A., Behrouz, M. K., Jafari, H. H., Eslami, M. R., Vahidnia, M., & Rezaie, M. (2019). Methodology of standardizing the energy labeling and rating of window fenestration in IRAN. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 33, 24-33.

https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.02.009

- Pachauri, R., & Reisinger, A., (2008) Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report, *Cambridge University Press*, Cambridge.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf

- Pásztory, Z. (2021). An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, 44.

https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102604

- Pereira, Júlia., et al. (2022). Performance of Solar Control Films on Building Glazing: A Literature Review. *Applied sciences*, 12.

https://doi.org/10.3390/app12125923

- Qiu, C., Yang, H., Sun, H. (2019). Investigation on the thermal performance of a novel vacuumPV glazing in different climates. *Energy Procedia*, 158, 706–11.

https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.190

- Rezaei, S.D., Shannigrahi, S., Ramakrishna, S. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Sol Energ Mat Sol C*, 159, 26–51.

https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.026

- Rezaei, S., Daqiqeh et al. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 159, 26-51.

http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.026

- Selkowitz, S.E. (2011). Thermal performance of insulating window systems. layers. *Journal of Building Engineering*, 76, 107159.

https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107159

- Li, S., Sun, G., Zou, K., & Zhang, X. (2016). Experimental research on the dynamic thermal performance of a noveltripe-panel building window filled with PCM. *Sustainable Cities and society*, 27, 15–22.

https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.08.014

- Liu, C., Wu, Y., Li, D., Zhou, Y., Wang, Zh., & Liu, Sh. (2017). Effect of PCM thickness and melting temperature on thermal performance of double glazing units. *J Build Eng*, 11, 87–95.

https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.04.005

- LolliN, Andresen I. (2016). Aerogel vs. argon insulation in windows: A green house gas emissions analysis. *Build Environ*, 101, 64–76.

https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.001

- Mempouo, B., Cooper, E., Riffat, SB. (2010). Novelwindowtechnologies and the code for sustainable homes in the UK. *Int J Low-Carbon Tec*, 5, 167–74.

https://doi.org/10.1093/ijlct/ctq013

- Meng, W., Jinqing, P., Hongxing, Y., Yimo, L. (2018). Performance evaluation of semitransparent CdTe thin film PV window applying on commercial buildings in Hong Kong. *Energy Procedia*, 152, 1091–6.

https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.131

- Michael, M. (2023). A Systematic Review and Classification of Glazing Technologies for Building Façades. *Energies*, 16.

https://doi.org/10.3390/en16145357

- NSG-Group. Pilkington EnergiKareTM.

https://www.pilkington.com/engb/uk/products/product-categories/thermal

- Olivieri, L., Frontini, F., Polo López, C., Pahud, D., & Caamaño-Martín, E. (2015). G-value indoor characterization of semi-transparent photovoltaic elements for building integration: New equipment and methodology. *Energ Build*, 101, 84–94.

Lawrence Berkeley National Laboratory, 8835, 1–19.

THERMAL PERFORMANCE OF INSULATING WINDOW SYSTEMS (escholarship.org)

- Silva, T., Vicente, R.D., & Rodrigues, F. (2016). Literature review on the use of phase change materials in glazing and shading solutions. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 53, 515-535.

http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.201

- Singh, MC., & Garg, SN. (2010). An empirical model for angle-dependant g-values of glazings. *Energ Build*, 42, 375–9.

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.004

- Skandalos, N., & Karamanis, D. (2015). PV glazing technologies. *Renew Sust Energ Rev*, 49, 306–22.

https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.145

- Skandalos, N., & Karamanis, D. (2015). PV glazing technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 306-322.

http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.145

- Solomon, S., IPCC. (2007). Climate Change the Physical Science Basis vol. 2007, *AGUFM*. U43D-U01.

https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/

- Solovyev, A., Rabotkin, S., & Kovsharov N. (2015). Polymer films with multilayer low-E coatings. *Mat Sci Semicon Proc*. 38, 80-373.

https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.02.051

- Uddin, M., Jie, J., Wang, C., Zhang, C., & Ke, W. (2023). A Review on Photovoltaic Combined Vacuum Glazing: Recent Advancement and Prospects. *Energy & Buildings*, 286.

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112939

- Useia, E. (2018). International energy outlook 2018 - highlights.

https://www.eia.gov/pressroom/presentations/capuano_07242018.pdf.

- Zhang, W., Lu., L, & Xu X. (2019). Thermal and daylighting performance of glass window using a newly developed transparent heat insulated coating. *Energy Procedia*, 158, 1080–5.

https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.262

نحوه ارجاع به مقاله:

کریمیان، ساجده و گرجی مهلبانی، یوسف. (۱۴۰۳). مروری بر شیشه‌ی پنجره‌های ساختمان با عملکرد بالا در انتقال حرارت، *توسعه پایدار شهری*، ۵(۱۶)، ۸۲-۶۵.

DOI: https://doi.org/10.22034/usd.2024.2024042.1219

DOR: https://dorl.net/dor/20.1001.1.27170128.1403.5.16.4.6

URL: https://usdjournal.daneshpajoohan.ac.ir/article_711798.html

Authors retain the copyright and full publishing rights.
Published by Daneshpajoohan Pishro Higher Education Institute. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)