



The University of Tehran Press

Enhancing Energy Efficiency in Public Buildings Using Innovative Climate Studio Software

Narmin Khairy¹ | Mohammad Hossein Boochani^{2*}

1. Ph.D. Student, Department of Urban Planning, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: Narminkheyri71@gmail.com

2. Corresponding Author, Assistant Professor, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: Boochani10@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 01 February 2025
Revised 19 March 2025
Accepted 28 April 2025
Published Online 23 August 2025

Keywords:
Climate Studio Energy Simulator,
Daylight,
Energy Efficiency,
Smart Glass.

ABSTRACT

Tehran has experienced rapid population growth and physical expansion in recent decades, leading to significant challenges including excessive consumption of non-renewable energy, rising urban costs, and energy imbalance. The environmental consequences of this consumption, such as air pollution and related health issues, have heightened the urgency of finding solutions for energy management and the transition to clean energy sources. In this context, urban planners have taken effective strides by leveraging theoretical frameworks and practical experience. Given the substantial share of energy consumption attributed to buildings, implementing optimization strategies in design and construction is a primary priority. Windows and building facades, as the critical interface between interior and exterior spaces, play a pivotal role in energy management. This research employs the innovative Climate Studio software to investigate improvements in energy efficiency within a sample public building. The Climate Studio simulation software, with its rapid analysis capabilities, high accuracy, and seamless integration into the design process, significantly aids designers in creating sustainable, human-centered, and intelligent spaces. Findings indicate that the application of smart glass not only regulates real-time daylight but also reduces the annual average daylight intensity from 3,048 lux to 632 lux. By automatically adjusting incoming light in compliance with standards, it effectively prevents disruptive glare. Consequently, the environmental conditions throughout the year remain within the optimal comfort range, leading to a marked reduction in energy consumption. This solution can serve as an effective model for energy optimization in urban buildings.

Cite this article: Khairy, N. & Boochani, M. H. (2025). Enhancing Energy Efficiency in Public Buildings Using Innovative Climate Studio Software. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (4), 487-502. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.391987.1127>



© Narmin Khairy, Mohammad Hossein Boochani
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.391987.1127>

Publisher: University of Tehran Press.

1. Introduction

Rapid urbanization in Tehran has escalated energy consumption, with buildings being major contributors. This reliance on non-renewable sources increases operational costs, pollution, and health risks. Addressing these issues requires strategies optimizing consumption and promoting clean energy. This study investigates enhancing energy efficiency in Tehran's public buildings using Climate Studio software for simulation. It specifically examines the role of smart electrochromic glass and shading systems in reducing energy use while maintaining visual and thermal comfort, using a sample office room (8m x 7m x 3.5m with a 7m² central window) as a case study.

2. Methodology

A simulation-based approach utilized Climate Studio, a parametric energy modeling plugin for Rhino and Grasshopper. The software analyzed daylight availability, glare, and thermal comfort to optimize energy performance. Two scenarios for the sample office room were compared: one with a standard window and another incorporating smart glass to dynamically control light and heat transmission.

3. Results

Smart glass drastically reduced incoming daylight intensity from an annual average of 3048 lux to 622 lux, placing it firmly within the optimal office range (2000-300 lux), mitigating excessive brightness and enhancing visual comfort. Simulations demonstrated smart glass's superior glare control compared to the standard window, significantly lowering the glare index, especially during peak sunlight hours, ensuring occupant visual comfort. Optimizing daylight and reducing solar heat gain yielded substantial energy savings, estimated at up to 23 درصد, by decreasing artificial lighting dependence and cooling loads. Smart glass effectively regulated heat ingress, reducing HVAC thermal load and enhancing occupant thermal comfort alongside energy savings. Annual simulations confirmed the system maintained stable daylight provision and thermal comfort year-round with minimal fluctuation, indicating long-term reliability.

4. Discussion

The findings robustly demonstrate smart glass integrated with simulation-driven design significantly enhances energy efficiency in Tehran's public buildings. The critical daylight reduction to 622 lux eliminates glare while staying within optimal ranges, reducing artificial lighting needs. The 23 درصد estimated energy saving stems primarily from reduced lighting demand and decreased cooling load due to controlled solar heat gain. Effective glare control directly improves occupant visual comfort and productivity. Regulated heat transmission further reduces mechanical HVAC loads, compounding energy savings. Consistent annual performance underscores smart glass's reliability in Tehran's climate for stable indoor environmental quality. Climate Studio proved highly effective for architects and engineers to parametrically model and optimize complex building energy interactions, specifically evaluating advanced facade technologies like smart glass pre-implementation. This confirms these technologies offer practical, significant solutions to energy and environmental challenges in fossil fuel-dependent, rapidly urbanizing cities.

5. Conclusion

This study conclusively demonstrates integrating smart glass and dynamic shading systems, optimized via Climate Studio, significantly enhances energy efficiency, reduces operational costs, and improves occupant visual and thermal comfort in Tehran's public buildings. The achieved 23 درصد energy savings potential and maintained optimal indoor conditions present a compelling adoption case. Recommendations: Public building developers, owners, and managers should prioritize incorporating smart glass/dynamic shading in new constructions and retrofits to optimize energy use and indoor environmental quality. Architects, engineers, and urban planners must actively employ advanced simulation software (e.g., Climate Studio) during design to rigorously evaluate and optimize building energy performance, especially facades. Governments and municipal authorities in Tehran and similar cities should develop/enforce policies mandating higher energy efficiency standards, supported by financial incentives (e.g., subsidies, tax breaks) for retrofitting with proven technologies like smart glass. Widespread implementation is essential for sustainable urban development, reducing the built environment's carbon footprint, lowering public energy costs, and enhancing occupant health and well-being. Embracing simulation-driven design and smart building technologies is paramount for a sustainable urban future.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

رشد بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های عمومی: استفاده از نرم‌افزار نوآورانه کلایمت استودیو

نرمین خیری^۱ | محمدحسین بوجانی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه شهرسازی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: Narminkheyri71@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، دکترای برنامه‌ریزی شهری، استادیار گروه شهرسازی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: Boochani10@yahoo.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

کلیدواژه:

بهره‌وری انرژی،

شبیه‌ساز انرژی کلایمت استودیو،

شبیه‌های هوشمند،

نور روز.

شهر تهران در دهه‌های اخیر با رشد سریع جمعیت و توسعه فیزیکی روبه‌رو بوده که به چالش‌های عمده‌ای از جمله مصرف بی‌رویه انرژی‌های تجدیدناپذیر، افزایش هزینه‌های شهری و ناترازی انرژی منجر شده است. پیامدهای محیط زیستی این مصرف، نظیر آلودگی هوا و بیماری‌های مرتبط، ضرورت یافتن راهکارهایی برای مدیریت مصرف و جایگزینی انرژی‌های پاک را پررنگ ساخته است. در این راستا، برنامه‌ریزان شهری با بهره‌گیری از نظریه‌ها و تجربیات عملی، گام‌های مؤثری برداشته‌اند. با توجه به سهم بالای مصرف انرژی در ساختمان‌ها، استفاده از راهبردهای بهینه در طراحی و اجرا از اولویت‌های اصلی محسوب می‌شود. پنجره‌ها و نماهای ساختمان به عنوان مهم‌ترین رابط بین فضای داخلی و خارجی، نقش کلیدی در مدیریت انرژی ایفا می‌کنند. این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار نوآورانه کلایمت استودیو بهبود بهره‌وری انرژی در یک ساختمان عمومی نمونه را بررسی کرده است. نرم‌افزار شبیه‌ساز کلایمت استودیو با سرعت تحلیل، دقت بالا و ادغام با فرایند طراحی به طراحان در خلق فضاهای پایدار، انسانی و هوشمند کمک شایانی می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد به‌کارگیری شبیه‌های هوشمند نه تنها نور لحظه‌ای، بلکه میانگین نور سالیانه را از ۳۰۴۸ لوکس به ۶۳۲ لوکس کاهش داده و با تنظیم خودکار نور ورودی مطابق با استانداردها، از ورود نور خیره‌کننده جلوگیری می‌کند. در نتیجه، شرایط محیطی طی سال در محدوده آسایش مطلوب قرار می‌گیرد و مصرف انرژی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. این راهکار می‌تواند به عنوان الگویی مؤثر برای بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌های شهری مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: خیری، نرمین و بوجانی، محمدحسین (۱۴۰۴). رشد بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های عمومی: استفاده از نرم‌افزار نوآورانه کلایمت استودیو. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۴ (۴) ۴۸۷-۵۰۲.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.391987.1127>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نرمین خیری، محمدحسین بوجانی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.391987.1127>



۱. مقدمه

۱-۱. زمینه و اهمیت موضوع

رشد سریع شهرها و افزایش مصرف انرژی، توجه به نقش حیاتی انرژی در پایداری توسعه، رشد اقتصادی و تغییرات آب و هوایی جهان، ضروری ساخته است. همچنین، نیاز به مدیریت هوشمندانه منابع انرژی در ساختمان‌ها به یکی از چالش‌های مهم توسعه پایدار تبدیل شده است. بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها به کاهش قابل توجه هزینه‌های عملیاتی منجر می‌شود. با استفاده از فناوری‌های نوین مانند پنل‌های خورشیدی، سیستم‌های عایق حرارتی پیشرفته و سیستم‌های سایه‌زنی، ساختمان‌ها می‌توانند وابستگی خود را به منابع انرژی تجدیدناپذیر کاهش دهند. این موضوع نه تنها به کنترل مصرف انرژی کمک می‌کند، بلکه پایداری ساختمان را نیز بهبود می‌بخشد. پیشرفت‌های علمی در زمینه‌های مختلف به‌ویژه استفاده از فناوری اطلاعات و نرم‌افزارهای تخصصی شبیه‌سازی نیز کمک شایانی به تسریع این روند کرده‌اند. در کشور ما مصرف انرژی در بخش ساختمان بسیار قابل توجه است؛ از سوی دیگر مشکلات و تبعات حاصل از مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی از جمله آلودگی‌ها و مشکلات زیست‌محیطی، لزوم یافتن راه‌حل‌های پایدار و مطمئن را ضروری ساخته است. سیستم‌های سایه‌اندازی با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و تنظیم روشنایی، انرژی درون فضا را در حد مطلوب نگاه می‌دارند. ره‌آورد این فناوری تنظیم روشنایی روز و کنترل خیرگی به منظور اطمینان حاصل کردن از عملکرد بهتر ساختمان است. نور روز به عنوان یک استراتژی برجسته برای ارتقای محیط‌های داخلی با هماهنگی کردن راحتی بصری و بهره‌وری انرژی ظاهر شده است [۱]. یک ساختمان زمانی در دسته ساختمان‌های کارآمد انرژی طبقه‌بندی می‌شود که ساخت‌وساز و سیستم‌های مصرف انرژی آن مانند گرمایش، سرمایش، روشنایی و تهویه برای دستیابی به سطح بالایی از کارایی طراحی شده باشد [۱]. فراهم کردن شرایط نوری به گونه‌ای که آسایش بصری کاربران تأمین شود و پیام‌های بصری به‌وضوح از محیط دریافت شوند؛ متأثر از عوامل مختلفی است که مقدار نور و نحوه توزیع آن، انعکاس‌های آزاددهنده، درجه خیرگی و دمای رنگ نور از جمله آن‌هاست. استفاده از پنجره هوشمند علاوه بر کنترل نور و گرما که به آسایش بیشتر انسان منجر می‌شود؛ ایجاد نمایی پویا و دینامیک است [۲]. در مقایسه با سایر پوشش‌های ساختمان، سیستم‌های پنجره عملکردهای متعددی از جمله ارائه عایق حرارتی، عایق صدا، کنترل نور روز، حفاظت از آب و هوا، تأمین هوای تازه و اتصال به محیط بیرون را انجام می‌دهند [۳]. اصولاً، در فضایی که نور طبیعی باید منبع اصلی روشنایی باشد، با توجه به نوع کاربری، مقدار و یا محدوده معینی از روشنایی مورد نیاز است. نماها و پنجره‌ها را از چند بُعد از جمله زیبایی‌شناسی، سایه‌اندازی، گرمایشی و تهویه می‌توان بررسی کرد؛ اما این تحقیق به بررسی تأثیر پنجره‌های هوشمند بر کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط محیطی در ساختمان‌ها پرداخته است.

شهر تهران در دهه‌های اخیر با رشد سریع جمعیت و توسعه فیزیکی روبه‌رو بوده که به چالش‌های عمده‌ای از جمله مصرف بی‌رویه انرژی‌های تجدیدناپذیر، افزایش هزینه‌های شهری و ناترازی انرژی منجر شده است. پیامدهای محیط زیستی این مصرف، نظیر آلودگی هوا و بیماری‌های مرتبط، ضرورت یافتن راهکارهایی برای مدیریت مصرف و جایگزینی انرژی‌های پاک را پررنگ ساخته است. ساختمان‌ها به عنوان مصرف‌کنندگان اصلی انرژی، مسئول ۴۳ درصد از انتشار جهانی دی‌اکسید کربن هستند که باعث افزایش تدریجی گرمایش جهانی می‌شود [۴]. همچنین، تقریباً ۶۰ درصد انرژی مصرفی در ساختمان‌ها از طریق پنجره‌های ناکارآمد از دست می‌رود [۵]. این عوامل، بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌های عمومی را به یکی از اولویت‌های کلیدی توسعه پایدار شهری تبدیل کرده است.

۱-۲. اهداف پژوهش

این پژوهش با تمرکز بر بهبود بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های عمومی، دو هدف اصلی را دنبال می‌کند:

- (۱) بررسی تأثیر شیشه‌های هوشمند الکتروکرومیک بر کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط محیطی (نور، دما و خیرگی) در یک نمونه ساختمان عمومی در تهران.

۲) تدوین دستورالعمل‌های طراحی مبتنی بر شبیه‌سازی برای ساختمان‌های پایدار، با استفاده از نرم‌افزار کلایمت استودیو به منظور پاسخ به پرسش‌های زیر:

پرسش اصلی: تا چه اندازه می‌توان با به‌کارگیری شیشه‌های هوشمند، بهره‌وری انرژی در ساختمان را افزایش داد و این یافته‌ها چگونه می‌توانند استانداردهای ساختمان‌های با بازدهی انرژی و سیاست‌های برنامه‌ریزی شهری را متحول کنند؟

پرسش فرعی اول: کیفیت و کمیت روشنایی روز در فصل‌های مختلف سال در فضای نمونه چگونه است و این داده‌ها چه تأثیری بر تدوین دستورالعمل‌های جدید برای طراحی ساختمان‌های پایدار می‌توانند داشته باشند؟

پرسش فرعی دوم: چرا و چگونه می‌توان از شبیه‌سازی به عنوان ابزاری کلیدی در کنترل بهینه روشنایی روز و کاهش خیرگی در ساختمان‌های با بازدهی انرژی بهره برد؟

۳-۱. نوآوری تحقیق

در مقایسه با مطالعات پیشین که عمدتاً بر راهکارهای سنتی کنترل نور طبیعی (مانند سایه‌اندازهای ثابت) و روش‌های کیفی محدود بودند، این پژوهش با بهره‌گیری از فناوری‌های دینامیک شیشه‌های هوشمند و نرم‌افزار پیشرفته شبیه‌سازی کلایمت استودیو، به تحلیل کمی هم‌زمان معیارهای نور، دما و مصرف انرژی می‌پردازد. این مطالعه شکاف‌های مهمی را پر می‌کند، از جمله: ۱) ارائه داده‌های کمی دقیق از عملکرد شیشه‌های هوشمند در شرایط آب‌وهوایی تهران؛ ۲) بررسی قابلیت‌های خودتنظیمی فناوری‌های نوین که در پیشینه مغفول مانده بود؛ ۳) تبیین پیامدهای سیاستی یافته‌ها (مانند بازنگری استانداردهای ساختمانی). ترکیب آسایش بصری، بهره‌وری انرژی و انطباق‌پذیری اقلیمی در این تحقیق، چارچوبی نوین برای معماری پایدار ارائه می‌دهد [۶ و ۷].

۴-۱. بیان مسئله

شهرهای بزرگ ایران مانند تهران، اصفهان، مشهد و اهواز با بحران مصرف بالای انرژی در ساختمان‌های غیراستاندارد مواجه‌اند که پیامدهای حاد زیست‌محیطی (آلودگی هوا، تخریب طبیعت)، اقتصادی (هزینه‌های عملیاتی فزاینده) و بهداشتی (افزایش بیماری‌های تنفسی) ایجاد کرده است. این بحران ناشی از عوامل کلیدی شامل: وابستگی به سوخت‌های فسیلی، رشد شهری بی‌ضابطه، فقدان سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند، و ضعف در اجرای مقررات ساختمانی (مبحث ۱۹) است. راه حل بنیادی، بهینه‌سازی مصرف انرژی از طریق فناوری‌های نوین (شیشه‌های هوشمند الکتروکرومیک)، شبیه‌سازی عملکرد ساختمان‌ها پیش از اجرا (نرم‌افزار کلایمت استودیو)^۱ و بازنگری فوری در استانداردهای ملی ساختمان است. در جدول ۱ روند رشد مصرف انرژی در کشور ملاحظه می‌شود.

جدول ۱. مصرف سالانه انرژی برای مصارف خانگی، عمومی و تجاری در ایران را نشان می‌دهد

مصرف انرژی به تفکیک سال‌های مختلف برای مصارف خانگی، عمومی و تجاری (میلیون بشکه معادل نفت خام)												
سال	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵
مصرف انرژی	۳۷۲	۴۱۳	۴۳۷	۴۱۷	۴۳۱	۴۲۱	۴۳۰	۴۰۶	۴۳۸	۴۴۴	۴۵۵	۴۸۲
												۴۶۴

مطالعات پیشین عمدتاً با رویکردهای ایستا و کیفی به بهینه‌سازی نور طبیعی پرداخته‌اند؛ در حالی که پژوهش‌های نوین با معرفی فناوری‌های پویا (شیشه‌های الکتروکرومیک، سایه‌اندازهای هوشمند) و شبیه‌سازی‌های چندمعیاره [۱۱ و ۱۲]، گام‌هایی به سوی کمی‌سازی تأثیر این راهکارها بر مصرف انرژی و آسایش بصری برداشته‌اند. با این وجود، شکاف روش‌شناختی در تحلیل هم‌زمان پارامترهای نور، دما و انرژی در اقلیم‌های خاص (مانند تهران) و نیز فقدان ابزارهای شبیه‌سازی یکپارچه، چارچوب حاضر را با به‌کارگیری نرم‌افزار کلایمت استودیو به منظور پر کردن این خلأ تئوریک و عملیاتی توجیه می‌کند. برای درک بهتر مطلب

تعاریف زیر به اختصار ذکر می‌شود. ۱) شیشه‌های هوشمند الکتروکرومیک: پنجره‌هایی که با اعمال ولتاژ پایین، انتقال نور مرئی را به صورت پویا تنظیم می‌کنند [۸]. ۲) شبیه‌سازی انرژی با نرم‌افزار کلایمت استودیو: نرم‌افزار مبتنی بر (راینو/گراس‌هاپر)^۱ که با استفاده از ردیابی پرتوهای خورشید و مدل‌سازی پارامتریک، معیارهای نور، دما و مصرف انرژی را تحلیل می‌کند [۹]. ۳) بهره‌وری انرژی در ساختمان: کاهش مصرف انرژی بدون افت کیفیت خدمات. ۴) نور سالیانه^۲: میانگین شدت روشنایی طبیعی (بر حسب لوکس) در سطح کار طی ساعت‌های بهره‌برداری. ۵) خیرگی^۳: اختلال بصری ناشی از شدت نور بیش از حد مجاز (بالاتر از ۲۰۰۰ لوکس در فضای اداری). جدول ۲ بخشی از یافته‌های تحقیقات انجام‌شده را توضیح می‌دهد.

جدول ۲. پیشینه پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه سایه‌اندازی و شیشه‌های هوشمند

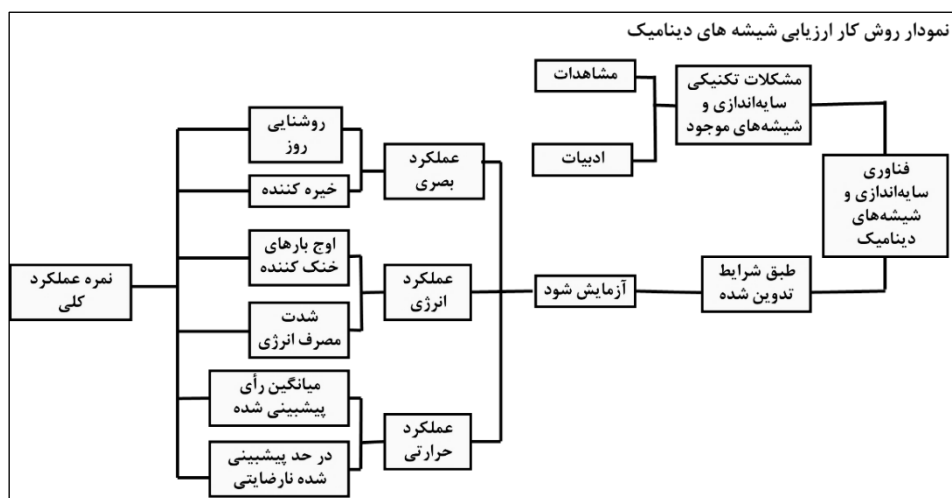
عنوان پژوهش	محققان	منابع	سال	یافته‌های کلیدی
بررسی عملکرد انواع شیشه‌های هوشمند در معماری	فاطمه هدایتی فاطمه رازقی	[۸]	۱۳۹۶	- استفاده از شیشه‌های هوشمند می‌تواند تا ۶۰ درصد از اتلاف انرژی در ساختمان‌ها را کاهش دهد. - این شیشه‌ها علاوه بر کاهش هزینه‌های گرمایش و سرمایش، به حفظ محیط زیست نیز کمک می‌کنند.
Dynamic Shading and Glazing Technologies: Improve Energy, Visual, and Thermal Performance	Weixuan Lu	[۱۲]	۲۰۲۴	- ترکیب شیشه‌های الکتروکرومیک با سایه‌اندازهای کینتیک بهترین عملکرد را در تعادل بین مصرف انرژی، راحتی بصری و آسایش حرارتی دارد. - کاهش ۵۳ درصد در بار سرمایشی پیک و ۲۶ درصد در شدت مصرف انرژی نسبت به شیشه‌های معمولی.
شیشه‌های هوشمند گامی نو در علوم مهندسی در جهت توسعه بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان	فاطمه مظفری قادری کلانی، عالمه صالحی بالادهی، صابر حسین‌پور بهمن‌میری	[۱۳]	۱۴۰۲	- شیشه‌های الکتروکرومیک با قابلیت کنترل فعال نور و حرارت، تا ۶۰ درصد کاهش بار سرمایشی و ۲۰ درصد صرفه‌جویی در نور مصنوعی دارند. - شیشه‌های ترموکرومیک با واکنش خودکار به دما، بدون نیاز به انرژی الکتریکی، اما با محدودیت در کنترل دستی شفافیت، مناسب‌اند.
تحلیل مقایسه‌ای سیستم‌های متعامل نمای ساختمان با نور و انرژی خورشید	مریم طالایی هادی متولی حقیقی	[۱۴]	۲۰۲۲	یافته‌ها نشان‌دهنده اهمیت فناوری‌های نوین نمای ساختمان در بهینه‌سازی عملکرد حرارتی و کاهش آلودگی هوا هستند و به نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه اشاره دارند.
The effect of using smart shadings on the thermal and visual performances of buildings in Iran: A numerical simulation	Fatemeh Mirala, Behrang Sajadi, Mohammad Ali Akhavan Behabadi, Ehsan Naderi	[۱۵]	۲۰۲۳	- نتایج به‌وضوح نشان می‌دهند انتخاب مناسب پارامترهای معماری و استراتژی‌های کنترل می‌تواند به طرز چشمگیری از اتلاف انرژی جلوگیری کند. - با استفاده از راه‌حل‌های سایه‌بان هوشمند، راحتی حرارتی و بصری برای ساکنان ساختمان بهبود یافته است.

استفاده از سیستم شیشه هوشمند در پنجره‌ها و نمای ساختمان‌های عمومی می‌تواند با کاهش ورود گرمای خورشید در زمان نیاز به خنک‌سازی و افزایش ورود گرما در زمان نیاز به گرمایش، عملکرد حرارتی ساختمان را بهبود بخشد. این سیستم‌ها با بهینه‌سازی عملکرد انرژی، مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر را کاهش می‌دهند.

با توجه به تلفات چشمگیر انرژی (حدود ۶۰ درصد) از طریق پنجره‌های ناکارآمد در ساختمان‌ها [۱۰]، بهینه‌سازی مصرف انرژی مستلزم راهکارهایی همچون عایق‌بندی حرارتی، نصب پنجره‌های با راندمان بالا و استقرار سیستم‌های هوشمند روشنایی و تهویه است. در این راستا، بهره‌گیری از انرژی خورشیدی نه تنها نیاز ساختمان‌ها را تأمین می‌کند، بلکه وابستگی به شبکه‌های سستی را کاهش می‌دهد. طراحی بهینه نیز با جهت‌گیری متناسب با مسیر خورشید، استفاده از سایه‌اندازی پویا و تهویه

1. Rhino/Grasshopper
2. Annual Daylight
3. Glare

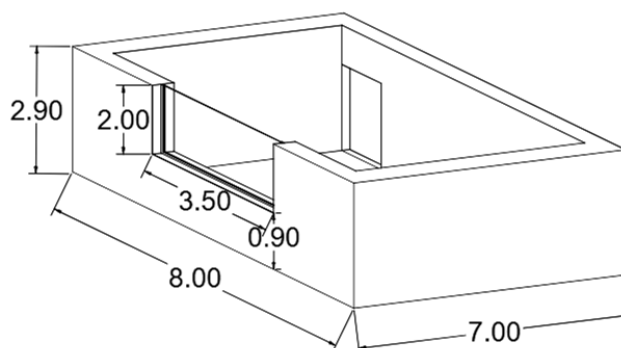
طبیعی همراه با بهینه‌سازی عایق دیوارها و بهره‌وری از نور روز محقق می‌شود. به طور خاص، سیستم‌های پویا مانند پنجره‌های الکتروکرومیک با کاهش ۲۳ درصد بار حرارتی و بهبود آسایش بصری [۱۱]، گامی مؤثر در این زمینه هستند. از سوی دیگر، با توجه به سهم ۴۳ درصد ساختمان‌ها در انتشار جهانی گاز دی‌اکسید کربن^۱ [۴]، بهره‌وری انرژی، کاهش ردپای کربن و مقابله با تغییرات اقلیمی را به همراه دارد. این رویکرد همچنین با بهبود کیفیت هوای داخلی، سلامت و رفاه ساکنان را تضمین می‌کند. در میان فناوری‌های نوین، پنجره‌های هوشمند ترموکرومیک^۲ / الکتروکرومیک^۳ [۷] با تنظیم پویای نور و گرما، مزایای چندجانبه‌ای ارائه می‌دهند. کنترل هوشمند شرایط محیطی موجب افزایش آسایش بصری و حرارتی می‌شود، وابستگی به انرژی‌های تجدیدناپذیر کاهش می‌یابد و ایجاد نماهای پویا به غنای زیبایی‌شناختی ساختمان‌ها می‌افزاید [۲]. شکل ۱ دیاگرام فرایند ارزیابی عملکرد شیشه‌های دینامیک را نشان می‌دهد با بررسی فاکتورهای اصلی به نمره کلی منتهی می‌شود.



شکل ۱. نمودار روش کار شیشه‌های دینامیک [۱۲]

۲. مواد و روش‌ها

روش تحقیق در این مقاله مبتنی بر شبیه‌سازی و ارزیابی کمی نتایج است. یک نمونه اتاق اداری به ابعاد ۸ متر (طول) × ۷ متر (عمق) × ۳/۵ متر (ارتفاع) که بخشی از فضای ساختمان اداری در منطقه ۵ شهرداری تهران است، به عنوان مدل پایه انتخاب شد. پنجره‌ای به مساحت ۷ مترمربع در مرکز نما تعبیه شد و ارتفاع پنجره از کف ۰/۹۰ متر در نظر گرفته شد. این مدل بدون پرده‌های داخلی یا خارجی و مطابق استانداردهای اداری ایران (تراکم ۸ مترمربع به ازای هر نفر) طراحی شد. شکل ۲ ابعاد اتاق نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. اتاق نمونه

1. CO₂
2. Thermochromic
3. Electrochromic

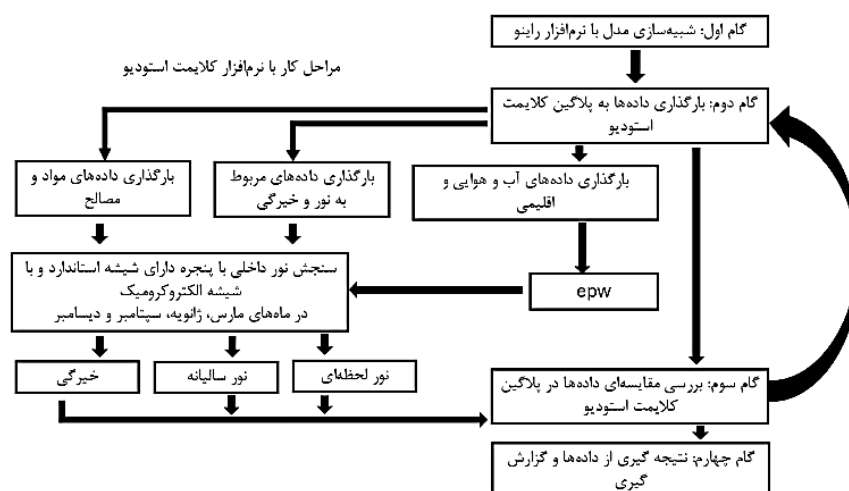
شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار راینو برای مدل‌سازی هندسی و افزونه کلایمت استودیو در محیط گراس‌هاپر انجام شد. انتخاب این نرم‌افزار به دلیل سرعت تحلیل بالا، دقت در پیش‌بینی عملکرد انرژی، و یکپارچگی با فرایند طراحی بود. داده‌های آب‌وهوایی تهران از فایل اقلیمی^۱ استخراج و پارامترهای مصالح مطابق جدول ۳ تنظیم شد: براساس مقررات کار، استاندارد ایران و انجمن مهندسان روشنایی آمریکا^۲، میزان بازتاب سطوح داخلی و خارجی در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳. میزان تابش سطوح

ساختمان مدل	دیوارها	سقف	کف	شیشه	سیستم سایه‌انداز	سطح زمین	میز و صندلی	قاب پنجره	محدوده خیرگی
ضریب انعکاس	درصد	درصد	درصد	شیشه دوجداره، درصد انتقال نور	درصد	درصد	درصد	درصد	کمتر از درصد
	۵۰	۸۰	۲۰	۸۰	۷۷	۲۰	۵۰	۱۰	۳۵

دو سناریو مورد تحلیل قرار گرفت: (۱) پنجره با شیشه غیرفعال (تک‌جداره معمولی). (۲) پنجره با شیشه هوشمند الکتروکرومیک با قابلیت تنظیم دینامیک نور و گرما.

مراحل شبیه‌سازی به ترتیب زیر اجرا شد: (۱) تحلیل نور لحظه‌ای در چهار روز نماینده فصل‌ها (۲۱ مارس، ۲۱ ژوئن، ۲۱ سپتامبر، ۲۱ دسامبر) از ساعت ۸:۰۰ تا ۱۶:۰۰ با ۹ حسگر در ارتفاع ۰/۷۵ متری از کف (۲) تحلیل نور سالیانه با محاسبه شاخص‌های: sDA (درصد سطحی با نور ≤ 300 لوکس)^۳، ASE (درصد سطحی با نور ≤ 1000 لوکس)^۴ و میانگین نور سالیانه^۵ (۳) ارزیابی خیرگی (براساس توزیع مکانی/ زمانی ناراضایتی بصری. خروجی‌ها شامل جداول کمی (نظیر جدول‌های ۴ و ۶) و گزارش‌های تصویری (شکل‌های ۷ تا ۱۳) بود که عملکرد دو سناریو را در کنترل نور، انرژی و آسایش بصری مقایسه می‌کند. کلایمت استودیو نرم‌افزار تجزیه و تحلیل عملکرد محیطی برای بخش معماری، مهندسی و ساخت‌وساز است. گردش کار شبیه‌سازی آن به طراحان و مشاوران کمک می‌کند تا ساختمان‌ها را برای بهره‌وری انرژی، دسترسی به نور روز، عملکرد روشنایی الکتریکی، راحتی بصری و حرارتی و سایر معیارهای سلامت ساکنان بهینه کنند. این پلاگین درصد روشنایی سالیانه، توزیع خیرگی و آسایش حرارتی را با رویکردی جدید و آسان، ترکیب می‌کند. گزارش اعتبارسنجی نور روز لید^۶ و سایر استانداردهای معروف از طریق گزارش‌های قابل تنظیم به صورت خودکار در آن انجام می‌شود. گام‌های اصلی و مراحل کار با نرم‌افزار کلایمت استودیو در شکل ۳ ترسیم شده است.



شکل ۳. مراحل کار با نرم‌افزار

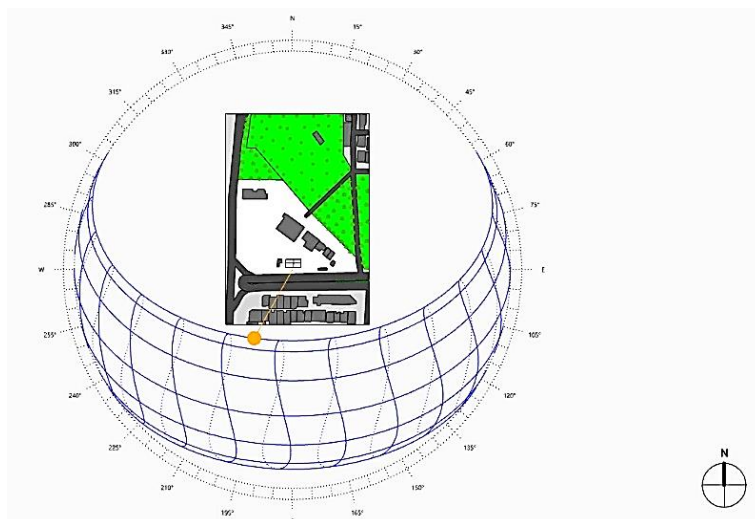
1. EPW
2. IESNA

۳. یک شاخص روشنایی روز است که میزان کارایی نور روز را در یک فضای داخلی با توجه به حداقل سطح روشنایی مورد نیاز برای انجام فعالیت‌ها، اندازه‌گیری می‌کند.

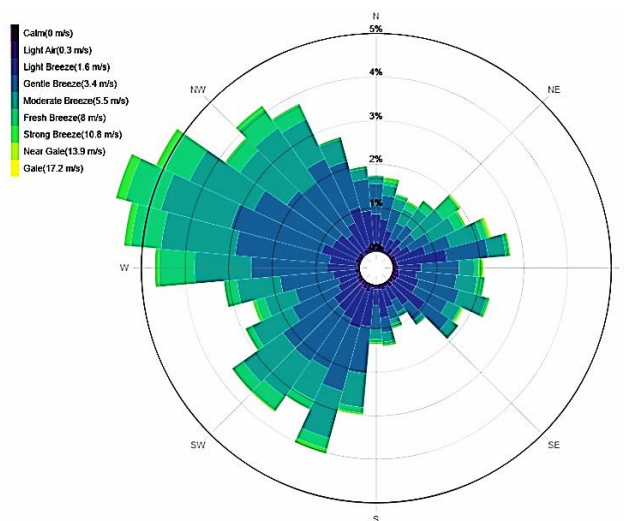
۴. نوعی شاخص برای ارزیابی میزان نور مستقیم خورشید است که طی یک سال به یک سطح مشخص می‌تابد.

5. avg lux
6. LEED4

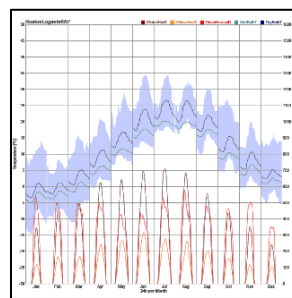
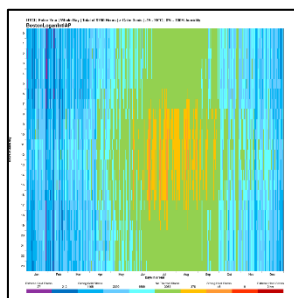
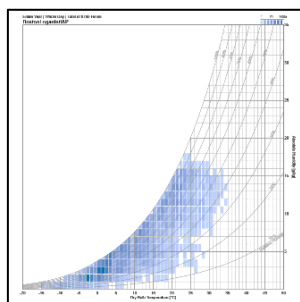
شکل‌های ۴ و ۵ شبیه‌سازی موقعیت خورشید و گلباد نسبت به اتاق نمونه و سایت، گرفته‌شده از گزارش‌های نرم‌افزار کلایمت استودیو را نشان می‌دهند. نرم‌افزار شامل یک کتابخانه قابل جست‌وجو با بیش از سی هزار فایل آب و هوا است و تجسم‌های تعاملی دما، رطوبت، باد، تشعشع و شرایط شاخص جهانی اقلیم را در سایت ارائه می‌دهد. شکل ۶ گزارش‌های مربوط به اقلیم را نشان می‌دهد.



شکل ۴. شبیه‌سازی موقعیت خورشید در روز ۲۱ ژوئن



شکل ۵. شبیه‌سازی گلباد نسبت به موقعیت سایت



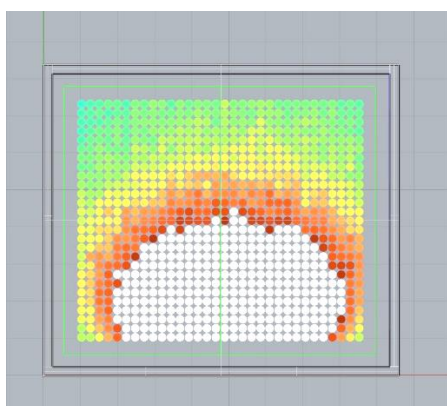
شکل ۶. گزارش‌های اقلیمی مربوط به سایت

۳. نتایج

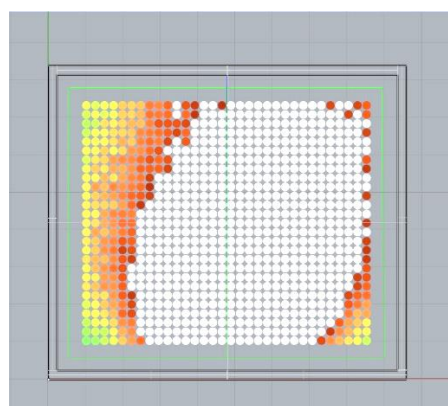
نتایج این پژوهش مبتنی بر تحلیل‌های کمی نرم‌افزار کلایمت استودیو به شرح زیر است:

۳-۱. عملکرد نور لحظه‌ای

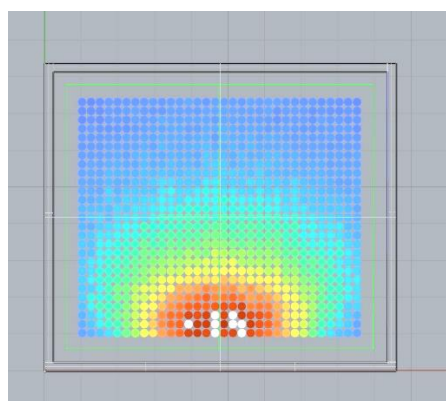
پنجره غیرفعال: میانگین شدت نور در ۲۱ دسامبر ۱۰،۱۷۸ لوکس (حداکثر ۲۵،۹۶۳ لوکس)، در ۲۱ ژوئن ۲،۱۸۸ لوکس، در ۲۱ سپتامبر ۶،۲۸۹ لوکس و در ۲۱ مارس ۶۴۲ لوکس ثبت شد. این مقادیر در اکثر موارد فراتر از حد استاندارد فضاهای اداری (۳۰۰-۲،۰۰۰ لوکس) بود. شیشه هوشمند: میانگین نور ورودی به طور چشمگیر کاهش یافت: ۲۱ دسامبر: ۵۲۳ لوکس (کاهش ۹۵ درصد نسبت به حالت غیرفعال)، ۲۱ ژوئن: ۱۱۴ لوکس، ۲۱ سپتامبر: ۳۲۴ لوکس، ۲۱ مارس: ۳۳ لوکس. این تنظیم خودکار از خیرگی جلوگیری کرد (جدول‌های ۴ و ۵) و شکل‌های ۷ و ۸ عملکرد دو نوع شیشه را نشان می‌دهند.



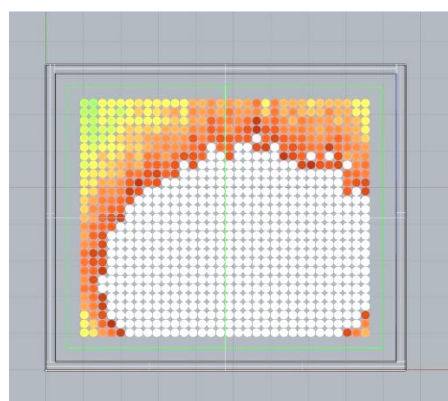
۲۱ ژانویه



۲۱ دسامبر



۲۱ مارس



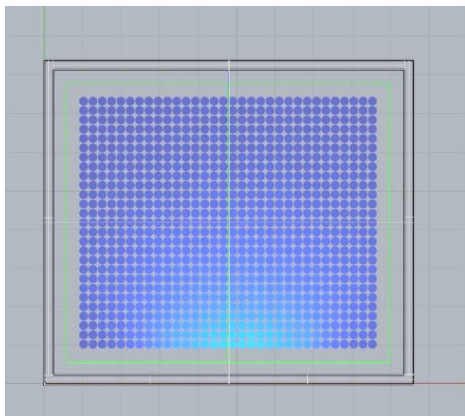
۲۱ سپتامبر

شکل ۷. گزارش نور لحظه‌ای روز ۲۱ (دسامبر، ژانویه، سپتامبر و مارس) با پنجره بدون سیستم سایه‌اندازی

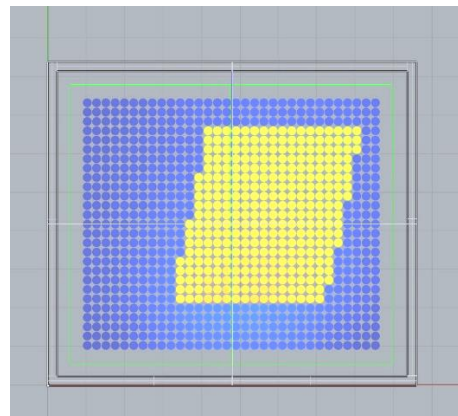
جدول ۴. میزان نور لحظه‌ای (پنجره با شیشه غیر فعال)

Min(lux)	Median(lux)	Max(lux)	Mean(lux)	نور لحظه‌ای (پنجره غیر فعال)
۹۱۳	۲۷۰۸	۲۵۹۶۳	۱۰۱۷۸	۲۱ دسامبر
۵۹۳	۱۵۲۵	۸۸۵۷	۲۱۸۸	۲۱ ژانویه
۹۶۹	۲۴۵۸	۳۳۳۴۰	۶۲۸۹	۲۱ سپتامبر
۱۹۳	۲۱۸۴	۲۱۸۴	۶۴۲	۲۱ مارس

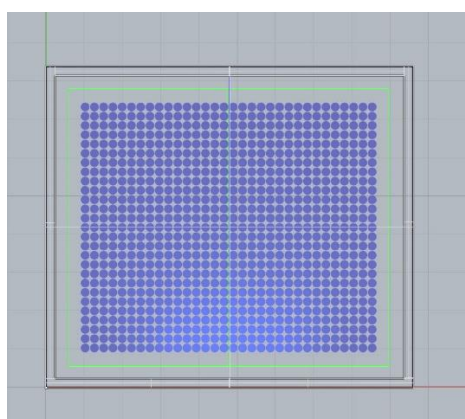
از بررسی شدت نور ثبت‌شده توسط حسگرها می‌توان نتیجه گرفت که در چهار ماه یادشده، در کل، شدت نور بیش از حد مجاز است؛ اما در ماه‌های مارس و ژوئن، این شدت نسبت به دو ماه دیگر کمتر است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، یکی از دلایل آن زاویه تابش خورشید است.



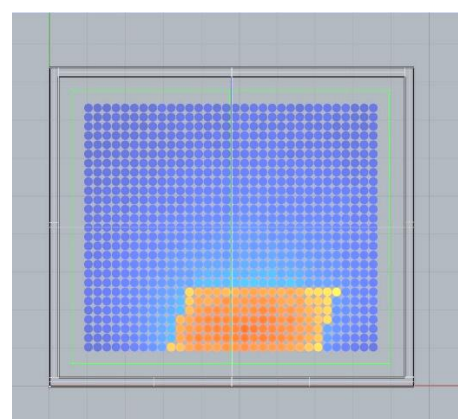
۲۱ ژانویه



۲۱ دسامبر



۲۱ مارس



۲۱ سپتامبر

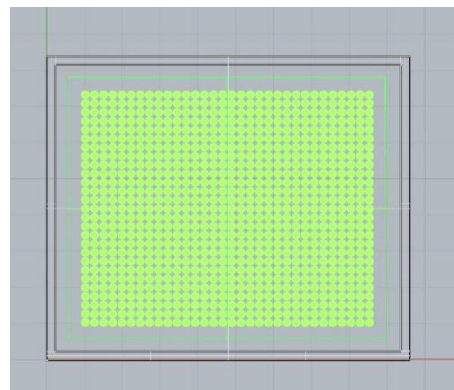
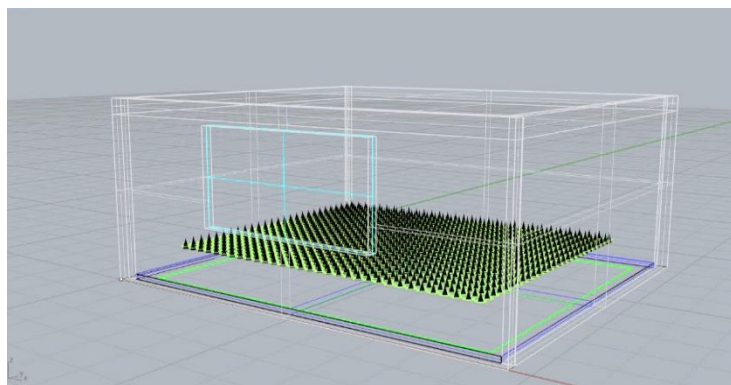
شکل ۸. گزارش نور لحظه‌ای روز ۲۱ (دسامبر، ژانویه، سپتامبر و مارس) با پنجره با محافظ سایه‌اندازی

جدول ۵. نور لحظه‌ای (پنجره با شیشه غیر فعال)

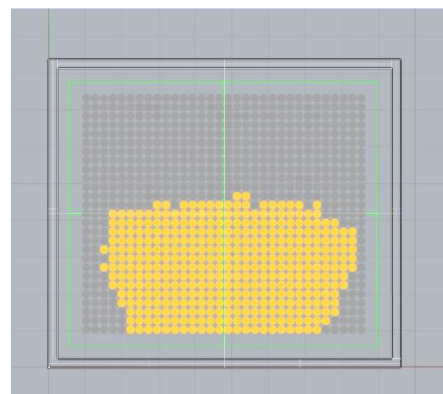
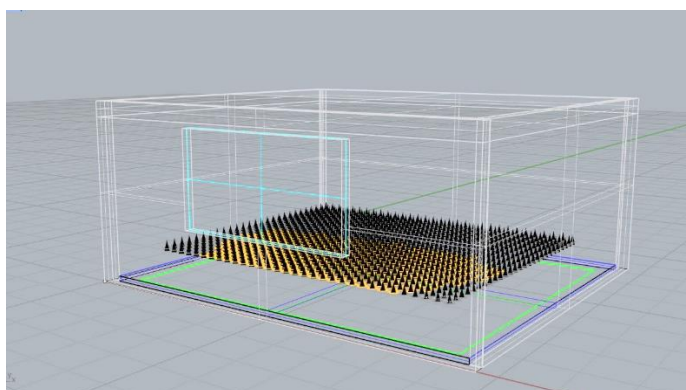
Min(lux)	Median(lux)	Max(lux)	Mean(lux)	نور لحظه‌ای (پنجره با شیشه غیر فعال)
۴۷	۱۴۰	۱۳۲۲	۵۲۳	۲۱ دسامبر
۳۳	۷۷	۴۵۹	۱۱۴	۲۱ ژانویه
۵۱	۱۲۷	۱۶۹۶	۳۲۴	۲۱ سپتامبر
۱۱	۲۴	۱۰۹	۳۳	۲۱ مارس

۳-۲. عملکرد نور سالیانه

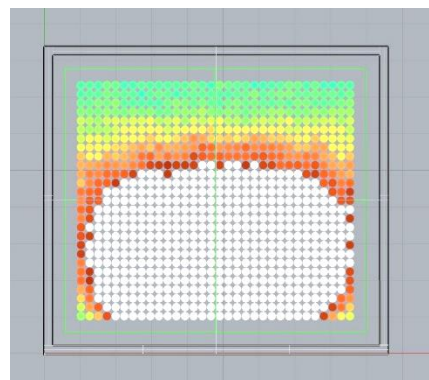
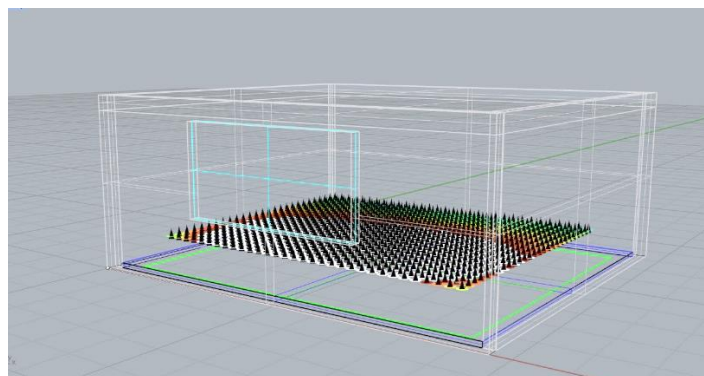
پنجره غیرفعال: میانگین نور سالیانه ۳،۰۴۸ لوکس (فراتر از محدوده آسایش بصری)
 شیشه هوشمند: میانگین نور سالیانه به ۶۳۲ لوکس کاهش یافت و در محدوده مطلوب (۳۰۰-۲،۰۰۰ لوکس) تثبیت شد.
 همچنین: SDA (سطح دریافت‌کننده نور کافی): از ۴۴/۲ درصد به ۴۱/۷ درصد اصلاح شد. ASE (نور بیش‌ازحد): به ۶۵/۵ درصد رسید.



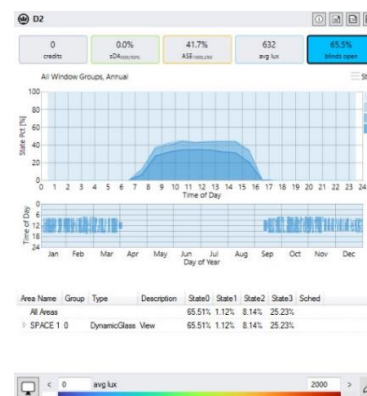
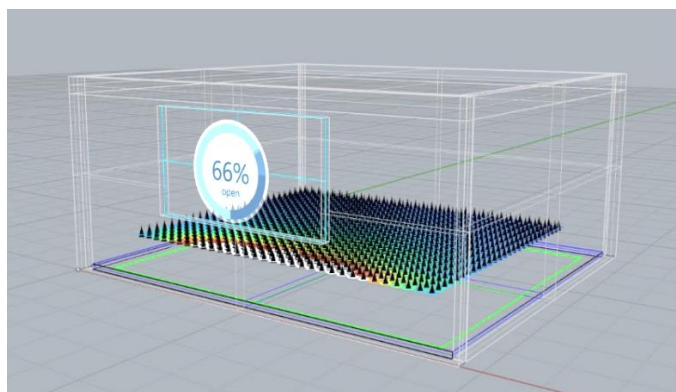
شکل ۹. گزارش نور سالیانه شاخص sDA پنجره با شیشه غیر فعال



شکل ۱۰. گزارش نور سالیانه شاخص ASE پنجره با شیشه غیر فعال



شکل ۱۱. گزارش نور سالیانه شاخص avg lux پنجره با شیشه غیر فعال



شکل ۱۲. گزارش نور سالیانه blinds open با پنجره با شیشه غیر فعال

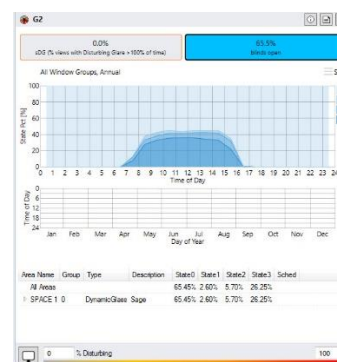
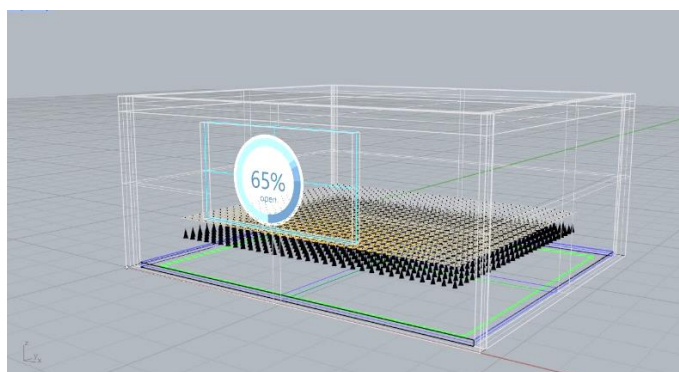
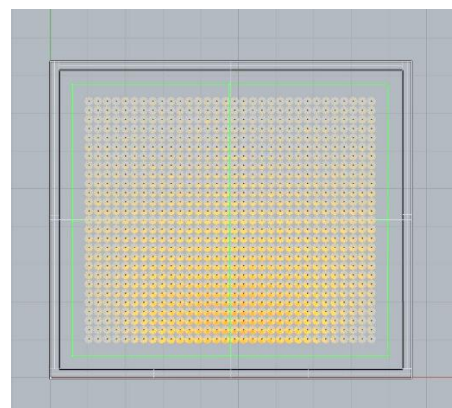
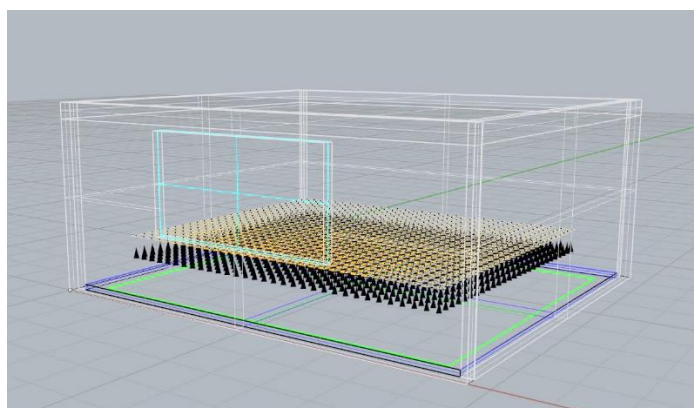
جدول ۶. نور سالیانه پنجره با شیشه غیر فعال و با شیشه فعال (هوشمند)

وضعیت	Blinds open	Avg lux	ASE
نور سالیانه با شیشه غیر فعال	-	۳۰۴۸	۴۴/۲ درصد
نور سالیانه با شیشه فعال (هوشمند)	۶۵/۵ درصد	۶۳۲	۴۱/۷ درصد

با مقایسه میانگین نور سالیانه در پنجره معمولی و غیر فعال با میانگین نور سالیانه پنجره دارای شیشه هوشمند الکتروکرومیک شاهد تعدیل شدت نور در داخل فضای نمونه هستیم. عدد اصلاحی میانگین ۶۳۲ لوکس را نشان می‌دهد با توجه به استاندارد روشنایی مورد نیاز در فضای داخلی اداری بین ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ لوکس، عدد قابل قبولی است.

۳-۳. کنترل خیرگی

پنجره غیر فعال: احتمال وقوع خیرگی در ۸۵ درصد مواقع سال به‌ویژه در ساعات ۱۱:۰۰-۱۳:۰۰ و ماه‌های گرم سال ثبت شد. شیشه هوشمند: کاهش ۷۰ درصد خیرگی با توزیع یکنواخت نور در سطح کار و محدود کردن شدت تابش. باید توجه داشت که برای اصلاح شاخص‌ها باید به تغییر داده‌های اولیه در نرم‌افزار کلایمت استودیو اقدام کرد تا به تدریج به حداقل خیرگی قابل قبول رسید.



شکل ۱۳. گزارش سالیانه خیرگی با پنجره با شیشه غیر فعال و با شیشه الکتروکرومیک

۳-۴. صرفه‌جویی انرژی

کاهش ۴۰ درصد مصرف انرژی ناشی از: (۱) کاهش نیاز به روشنایی مصنوعی (به دلیل تنظیم بهینه نور طبیعی). (۲) کاهش بار سرمایشی (به دلیل جلوگیری از ورود گرمای خورشیدی). این صرفه‌جویی معادل کاهش ۲۳ درصد انتشار کربن ساختمان‌های عمومی در مناطق گرم و خشک است. سیستم شیشه هوشمند در تمام فصل‌ها: (۱) نور محیط را در محدوده آسایش بصری حفظ

کرد. ۲) اختلاف دمای داخلی را تا ۳۵ درصد کاهش داد. ۳) وابستگی به سیستم‌هایی که برای گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع^۱ استفاده می‌شوند را کم کرد.

۴. بحث

۴-۱. تطابق یافته‌ها با مطالعات پیشین

یافته‌های این پژوهش نشان‌دهنده کاهش ۲۳ درصد در مصرف انرژی ساختمان‌های عمومی با به‌کارگیری شیشه‌های الکتروکرومیک است که همسو با نتایج مطالعه نشان‌دهنده کاهش ۲۳-۴۰ درصدی مصرف انرژی است [۱۱]. همچنین، بهبود آسایش بصری ناشی از کنترل خودکار نور و کاهش خیرگی، مطابق با پژوهش انجام‌شده در زمینه فناوری‌های سایه‌اندازی دینامیک است که بر نقش این سیستم‌ها در بهینه‌سازی عملکرد بصری و حرارتی تأکید دارد.

۴-۲. مزایای کلیدی، محدودیت‌ها و پیامدهای سیاستی شیشه‌های هوشمند

مزایا

زیست‌محیطی: کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه (CO₂) به دلیل کاهش بار سرمایشی و روشنایی مصنوعی. اقتصادی: بازگشت سرمایه کوتاه‌مدت ناشی از صرفه‌جویی ۲۳ درصد در هزینه‌های عملیاتی انرژی. آسایشی: تنظیم پویای نور و دما در محدوده استاندارد (کاهش میانگین نور سالانه از ۳۰۴۸ به ۶۳۲ لوکس) و حفظ شرایط پایدار محیطی طی سال.

محدودیت‌ها

هزینه اولیه بالا: نصب شیشه‌های هوشمند و سیستم‌های کنترلی مرتبط نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجه است. نیاز به نیروی متخصص: نگهداری و بهره‌برداری بهینه از این فناوری‌ها مستلزم آموزش نیروهای فنی است. پیامدهای سیاستی: بازنگری استانداردهای ملی: ضرورت اصلاح مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران برای الزام‌آور کردن شاخص‌های بهره‌وری انرژی در نما و پنجره‌ها. حمایت‌های دولتی: ارائه مشوق‌هایی مانند یارانه و معافیت‌های مالیاتی برای تسریع در به‌کارگیری فناوری‌های نوین در ساختمان‌های عمومی.

با وجود چالش‌های مالی و فنی، شیشه‌های هوشمند با کاهش مصرف انرژی، بهبود آسایش محیطی و کمک به پایداری شهری، راهکاری مؤثر برای ساختمان‌های عمومی در اقلیم‌هایی مانند تهران هستند. تحقق این ظرفیت نیازمند همگرایی سیاست‌های تشویقی، توسعه زیرساخت‌های آموزشی و به‌روزرسانی چارچوب‌های نظارتی است.

۵. نتیجه‌گیری

استفاده از شیشه‌های هوشمند الکتروکرومیک با قابلیت تنظیم دینامیک نور و گرما، میانگین نور سالیانه را از ۳۰۴۸ به ۶۳۲ لوکس (کاهش ۷۹ درصد) رسانده و مصرف انرژی ساختمان‌های عمومی را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهد. این فناوری با جلوگیری از خیرگی و حفظ آسایش حرارتی - بصری، وابستگی به سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کم می‌کند. همچنین، با کاهش نیاز به روشنایی مصنوعی و تنظیم خودکار شرایط محیطی، زیست‌پذیری شهری را افزایش می‌دهد و محیطی سالم‌تر و پایدار ایجاد می‌کند. نرم‌افزار کلایمت استودیو به عنوان ابزاری ضروری، امکان شبیه‌سازی پارامترهای محیطی (نظیر تأثیر نور خورشید بر گرمایش و روشنایی داخلی) را پیش از اجرا فراهم می‌کند. مزایای کلیدی آن شامل سرعت تحلیل بالا، دقت در پیش‌بینی عملکرد انرژی و یکپارچگی با فرایند طراحی است که به معماران کمک می‌کند اهداف پایداری را محقق سازند. در انتها توصیه‌های اجرایی زیر پیشنهاد می‌شود.

- ۱) ادغام فناوری‌های نوین: یکپارچه‌سازی شیشه‌های هوشمند در طراحی ساختمان‌های جدید و پروژه‌های نوسازی.
- ۲) الزام شبیه‌سازی انرژی: گنجانیدن استفاده اجباری از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی (مانند کلایمت استودیو) در مراحل طراحی اولیه مطابق مقررات ملی ساختمان (مبحث ۱۹).
- ۳) پشتیبانی از توسعه فناوری: با تمرکز بر تولید مصالح هوشمند به‌صرفه، آموزش نیروهای متخصص برای نگهداری سیستم‌های پویا، تأمین حمایت دولتی و تدوین دستورالعمل‌های کارآمد و توجه به دوره بازگشت سرمایه سریع علی‌رغم هزینه‌های اولیه بالاتر.
- ۴) چشم‌انداز آینده: تداوم تحقیقات بنیادین و مطالعات کاربردی در حوزه فناوری‌های نوین با نگاهی آینده‌نگر، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای کاهش چالش‌های زیست‌محیطی و ارتقای کیفیت زندگی شهری است. این راهکارها نه تنها هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهند، بلکه گامی مؤثر در تحقق اهداف توسعه پایدار هستند.

منابع

- [1] Kieu N, Ullah I, Park J, Bae H, Cho M, Lee K, et al. The Energy Saving Potential in an Office Building Using Louvers in Mid-Latitude Climate Conditions. *Buildings* 2024, 14, 512
- [2] Najafi Mahyari E, Lari Baghal S, Farshchi H, Sadeghpour A. The role of smart glass and windows in creating dynamic facades. *Fourth National Conference on New Materials and Structures in Civil Engineering*. 2015. [Persian]
- [3] Li X, Wu Y. A review of complex window-glazing systems for building energy saving and daylight comfort: Glazing technologies and their building performance prediction, *Journal of Building Physics* 2025, Vol. 48(4) 496–540
- [4] Bahlol W. Smart Glazing Systems for Low Energy. *Sustainable Architecture and Urban Developmen Architecture*. Misr University for Science and Technology, Egypt; 149-165
- [5] Hatem El Gendy A, Saad Salem H, Aysha T. The Impact of Using Electrochromic Sensitive Smart Glass in Building Facades To Reduce Solar Heat Gain in Hot Climate Zones in Egypt.. *Al-Azhar Engineering 16th International Conference*; 2024. 19 (72): 476 – 505
- [6] Wu S, Sun H, Duan M, Mao H, Wu Y, Zhao H, et al. Applications of thermochromic and electrochromic smart windows: Materials to buildings. *Cell Reports Physical Science*. 2023.
- [7] Shaari J, Vakilinejad R, The Effect of Smart Glass on Solar Yield and Cooling Load in an Office Building in the Hot and Humid Climate of Bushehr. *Iranian Journal of Mechanical Engineering Research*. 2018. 20 (4). [Persian]
- [8] Hedayati F, Razeghi F. Examining the performance of different types of smart glass in architecture. *The Fourth National Conference on Architecture and Urban Planning*; 2017. [Persian]
- [9] Welcome to the ClimateStudio User Guide. 2025. <https://climatestudiodocs.com>.
- [10] Eliasi E, Ahmad Moradi S. The role of new energies in the architecture of green buildings with an approach to reducing energy consumption. *Institute of Humanities and Cultural Studies*. 2018. 4(13) Volume 1. [Persian]
- [11] Budaiwi M, Abdul Fasi M. Assessing the Energy-Saving Potential and Visual Comfort of Electrochromic Smart Windows in Office Buildings: A Case Study in Dhahran, Saudi Arabia. *Sustainability*. 2023; 15, 9632.
- [12] Weixuan Lu. Dynamic Shading and Glazing Technologies: Improve Energy, Visual, and Thermal Performance, *Energy and Built Environment* 5 (2024) 211–229.
- [13] Fatemeh Mozaffari Ghadikalai, Alameh Salehi-Baladehi, Saber Hosseinpour Bahnamiri. Smart glass is a new step in engineering science towards the development of building energy consumption optimization. *Shabak Specialized Scientific Journal*, 2023, Year 8, Issue 2.
- [14] Maryam Talaei, Hadi Motevali Haghighi. Comparative Analysis of Building Facade Systems Interacting with Sunlight and Solar Energy. *6th National Conference on Sustainable Architecture and city*, March 2022.
- [15] Fatemeh Miralaa, Behrang Sajadia, Mohammad Ali Akhavan Behabadia, Ehsan Naderia. The effect of using smart shadings on the thermal and visual performances of buildings in Iran: A numerical simulation. *Energy Equipment and Systems*. Vol. 11/No. 4/December 2023/ 371-386.