



The University of Tehran Press

Assessment of Window-to-Floor Ratio, Window Geometry, and Placement in Relation to Visual Comfort and Energy Efficiency in North-Facing Facades of Office Buildings in Tehran

Reza Mokhtary¹ | Hasan Rezaei^{2*}

1. M.Sc. Architectural Engineering with a specialization in Energy, Islamic Azad University, Najafabad Branch. Esfahan, Email: rezamokhtary69@gmail.com

2. Corresponding Author, Assistant Professor of Climatology Imam Ali Military University, Tehran. Email: rezaei_h@iamu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 01 February 2025
Revised 15 March 2025
Accepted 05 April 2025
Published Online 22 June 2025

Keywords:
Visual comfort,
Office Buildings,
Daylight,
Energy consumption,
North view,
Design builder.

ABSTRACT

Windows serve as a critical architectural element for channeling daylight into interior spaces. When designed in alignment with functional requirements, temporal patterns, and climatic conditions, they can transform daylight into a primary lighting source, enhancing occupants' visual comfort while significantly reducing energy demand for artificial lighting and thermal regulation. This study aims to evaluate window design parameters—including geometry, positioning, and Window-to-Floor Ratio (WFR)—through the lens of visual comfort, and subsequently analyze their impact on energy efficiency in north-facing façades of Tehran's office buildings. Using Design Builder software, parametric modeling and simulation of multiple scenarios were conducted to optimize window configurations. Findings reveal that WFR, window shape, and placement directly influence indoor illuminance levels. Specifically, horizontally oriented rectangular windows (aspect ratio 1:1.5) with a WFR of 20%, positioned in the upper section of the façade, emerge as an optimal solution for balancing daylight provision and energy performance in Tehran's north-oriented office buildings.

Cite this article: Mokhtary, R. & Rezaei, H. (2025). Assessment of Window-to-Floor Ratio, Window Geometry, and Placement in Relation to Visual Comfort and Energy Efficiency in North-Facing Facades of Office Buildings in Tehran. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (3), 251-265. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.386807.1109>



© Reza Mokhtary, Hasan Rezaei
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.386807.1109>

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

The imperative to reduce energy consumption in recent decades—driven by the dual objectives of minimizing fossil fuel reliance and leveraging the proven psychological and physiological benefits of natural light—has established daylight utilization as a fundamental principle in sustainable building design. Among building components, windows serve as the primary conduit for daylight transmission into interior spaces. However, inadequate consideration of regional climate and functional requirements in window design parameters (e.g., size, geometry, and placement) has resulted in suboptimal lighting conditions, ranging from insufficient illumination to excessive glare. Addressing these challenges necessitates systematic optimization of window specifications to enhance luminous quality while reducing electrical energy demand in existing structures.

This study aims to identify the optimal window-to-floor ratio (WFR), geometry, and placement for office spaces in Tehran, with dual objectives:

- Ensuring annual daylight sufficiency aligned with functional needs.
- Minimizing energy consumption to achieve thermal comfort thresholds.

By developing climate-responsive models for north-facing façades, this research provides actionable strategies to improve daylight efficiency and reduce operational energy consumption in office buildings.

Methodology

This study was carried out using the Design Builder software. The research process includes several steps: Initially, concepts related to daylight and energy use are analyzed based on previous studies and theoretical frameworks. Following that, the independent variables—such as shape, location, and the ratio of opening area to floor area—are identified alongside the dependent variables, which are visual comfort and energy consumption. Since office spaces come in many shapes and sizes, the main living area serves as the reference model for creating scenarios in Design Builder, in line with national regulations. Once the scenarios are developed, they are evaluated first on the basis of visual comfort, and then the best models are chosen according to visual comfort standards. Finally, the top scenarios for visual comfort are assessed regarding energy consumption, leading to the identification of the most efficient models for each case.

Key Results

Following the research, it can be concluded that a horizontal rectangular window on the upper part of the northern facade, featuring a ratio of 1.5:1 and a window-to-wall ratio (WFR) of 20%, is an effective choice for office buildings in Tehran according to the (LEED v4) standards for energy use. Nevertheless, it's important to emphasize that a horizontal rectangular window with a 2:1 ratio and a WFR of 50% has shown superior results concerning daylight criteria (in both LEED v2/v4 and daylight factor) despite slightly increased energy usage, making it another viable option for the upper northern facade. Furthermore, for the central and lower sections of this facade, a vertical rectangular window with a 1:2 ratio and a WFR of 30% serves as an effective choice for Tehran office buildings based on (LEED v4) guidelines and energy efficiency.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

ارزیابی نسبت سطح پنجره به سطح کف، فرم و موقعیت پنجره با توجه به آسایش بصری و مصرف انرژی در نمای شمالی ساختمان‌های اداری تهران

رضا مختاری^۱ | حسن رضائی^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد مهندسی معماری با گرایش انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، اصفهان. رایانامه: rezamokhtary69@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استادیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه افسری امام علی^(ع)، تهران، ایران. رایانامه: rezaei_h@iamu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

پنجره‌ها اصلی‌ترین جزء هر ساختمان در ورود نور روز به درون فضا هستند، توجه به نوع کاربری و زمان استفاده از فضا در کنار توجه به اقلیم است که می‌تواند نور روز را به نور غالب در ساختمان تبدیل کند، و تنها در این صورت است که بهره‌برداران و ساکنان فضا احساس آسایش بصری مطلوبی را تجربه می‌کنند و در نتیجه، میزان انرژی مصرفی برای روشنایی و آسایش حرارتی هم کاهش می‌یابد. هدف این پژوهش، بررسی شاخصه‌های پنجره با رویکرد آسایش بصری و سپس بررسی مصرف بهینه انرژی پنجره‌های با نور روز مطلوب در ساختمان‌های اداری تهران است. به همین منظور، بهینه‌یابی پنجره‌ها بر مبنای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سناریوها در نرم‌افزار دیزاین بیلدر، صورت گرفته است. نتایج نشان‌دهنده نقش مؤثر نسبت مساحت پنجره به سطح کف (WFR)، موقعیت و شکل پنجره در میزان روشنایی فضای داخل است، به گونه‌ای که بر اساس بررسی‌ها شکل مستطیل افقی (با نسبت ۱/۱،۵) و نسبت مساحت پنجره به سطح کف فضای داخل برابر با ۲۰ درصد در موقعیت بالا می‌تواند یکی از گزینه‌های کارا برای پنجره‌های نمای شمالی ساختمان اداری شهر تهران باشد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

کلیدواژه:

آسایش بصری،

ساختمان‌های اداری،

نور روز،

مصرف انرژی،

نمای شمال،

دیزاین بیلدر.

استناد: مختاری، رضا و رضائی، حسن (۱۴۰۴). ارزیابی نسبت سطح پنجره به سطح کف، فرم و موقعیت پنجره با توجه به آسایش بصری و مصرف انرژی در نمای شمالی ساختمان‌های اداری تهران. *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*، ۴ (۳) ۲۶۵-۲۵۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.386807.1109>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© رضا مختاری، حسن رضائی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.386807.1109>



۱. مقدمه

لزوم کاهش مصرف انرژی در دهه‌های اخیر و وجود تأثیرات مثبت روانی و فیزیکی نور طبیعی بر استفاده‌کنندگان فضا، استفاده از نور روز در ساختمان‌ها را به یکی از اصول اصلی در ساختمان و طراحی آن تبدیل کرده است [۱]. بی‌توجهی به شکل و تناسب پنجره نسبت به جهات جغرافیایی و استفاده از پنجره‌های یکسان و تناسب نداشتن سطح پنجره با سطح فضای پشت از نظر اقلیمی و محیطی، مشکلاتی پدید آورده و باعث معضل کاربران فضا در تأمین روشنایی کافی و رهایی از آفتاب ناخواسته شده که از دست دادن کارایی پنجره به عنوان ارتباط‌دهنده محیط درون و بیرون را در پی داشته است [۲]. همچنین، با توجه به تأثیرات زیست‌محیطی و کلان استفاده از روشنایی الکتریکی و با توجه به آنکه بیشتر الکتریسیته موجود، از سوخت‌های فسیلی و منابع تجدیدناپذیر تأمین می‌شود و از آنجا که از هر سه واحد سوخت فسیلی سوزانده‌شده، تنها یک واحد الکتریسیته تولید شده و دو واحد دیگر به گرما تبدیل می‌شوند، استفاده هر چه بیشتر از انرژی الکتریکی به مشکلات حادث در زمینه زیست‌محیطی و دمای کره زمین می‌انجامد [۳]. تا کنون تحقیقات زیادی در مورد تأثیر نور روز بر سلامتی انسان انجام شده و گزینه‌هایی نظیر سلامتی بینایی، هوشیاری، شناخت و سایر موارد بررسی شده است، که تمامی نتایج نشان از تأثیر قابل توجه نور روز بر سلامتی انسان دارد. به گونه‌ای که در پژوهشی که در دبستانی بر عملکرد دانش‌آموزان انجام شده، نتایج نشان می‌دهد دانش‌آموزان در کلاس درس با میزان بهینه روشنایی روز ۲۱ درصد یادگیری بهتری در مقایسه با دانش‌آموزان در کلاس با نور روز غیر بهینه هستند [۴]. البته بهره‌مندی از نور روز باید با توجه به اقلیم مورد نظر، کاربری و مدت زمان استفاده از فضا تعیین شود و تنها در این صورت است که نور طبیعی در آن مکان، نور غالب طی روز خواهد بود و ساکنان احساس آسایش بصری و دمایی مطلوبی را تجربه می‌کنند و در این حالت است که میزان انرژی مصرفی برای نور مصنوعی، گرمایش و سرمایش در قیاس با سایر ساختمان‌ها کمتر خواهد بود [۵]. با توجه به آنکه در بین تمامی اجزای ساختمانی، پنجره‌ها نقشی تعیین‌کننده در انتقال نور روز به فضاهای داخل را ایفا می‌کنند [۶] و به علت وجود ضعف در زمینه بهینه‌سازی پنجره‌ها به منظور بهبود کیفیت نور فضای داخلی و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های موجود، هدف پژوهش حاضر یافتن سطح بهینه بازشو نسبت به سطح کف فضا و فرم و موقعیت بهینه پنجره برای فضاهای اداری تهران است. این پژوهش در عین توجه به منظور تأمین میزان کافی و مطلوب روشنایی روز در فضا بر اساس عملکرد در بازه سالانه به یافتن بهینه‌ترین میزان مصرف انرژی برای رسیدن به محدوده آسایش حرارتی نیز توجه دارد و به ارائه مدل‌هایی به منظور بهبود بهره نوری و کاهش مصرف انرژی، متناسب با شرایط اقلیمی مد نظر برای نماهای شمالی ساختمان‌های اداری، جهت کاربران و فعالان مرتبط در این حوزه می‌پردازد.

با بررسی پژوهش‌های انجام‌شده می‌توان دریافت که اندازه پنجره در قسمت انتهایی فضا که بیشتر روشنایی مصنوعی استفاده می‌شود اهمیت پیدا می‌کند، و نصب پنجره در موقعیت بالاتر نسبت به موقعیت مرکز باعث ایجاد آناومی بهتر نور در انتهای فضا می‌شود و همچنین پنجره‌های افقی نیز نسبت به سایر شکل‌ها تأثیر بیشتری بر حفظ انرژی دارند [۷]. در یک ساختمان اداری معمولی، روشنایی مصنوعی، سرمایش و گرمایش قسمت عمده انرژی را مصرف می‌کنند، راحتی بصری بر سطح بهره‌وری کارمندان حائز اهمیت است، بر اساس میزان مصرف انرژی، بهینه‌ترین نوع پنجره^۱ است [۸]. از همین‌رو، استفاده برنامه‌ریزی‌شده از نور طبیعی می‌تواند یک استراتژی به‌صرفه برای کاهش مصرف انرژی باشد. این کاهش مصرف بیشتر با به حداقل رساندن استفاده از روشنایی الکتریکی، و همچنین به دلیل تأثیر آن در مورد بارهای گرمایشی و سرمایشی ساختمان اتفاق می‌افتد و این کاهش مصرف انرژی با به حداکثر رساندن و در دسترس بودن نور روز در محیط‌های داخلی با استفاده از یک طراحی مناسب در فضاها، بازشوها و سایه‌بان‌ها ایجاد می‌شود [۹]. افزون بر عملکرد نور روز، بر کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی باید توجه داشت که نسبت مساحت پنجره به کف بیشتر از (۳۰ تا ۴۰ درصد) در پنجره‌های جبهه جنوبی تأثیر محدودی بر کاهش مصرف انرژی گرمایشی در فضا دارند و این نسبت باید بهینه‌یابی شود [۱۰]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که دلیل آنکه نسبت مساحت پنجره به سطح دیوار به طور مستقیم تأثیر زیادی بر کیفیت فضا ندارد، نسبت مساحت پنجره به سطح کف به معیار مناسب‌تری برای طراحی است. این نسبت به دلیل آنکه هم مساحت پنجره و هم مساحت فضای داخلی را در نظر می‌گیرد،

1. double-pane clear-glass

می‌تواند به طراحان و معماران دیدگاه دقیق‌تری از تعامل نور، تهویه و زیبایی‌شناسی فضا ارائه دهد [۱۱]. همچنین، نتایج پژوهش‌هایی که به بررسی نسبت مساحت پنجره به مساحت کف پرداخته‌اند، نشان می‌دهد نسبت مساحت پنجره به مساحت کف باید بر اساس نوع کاربری، ویژگی‌های اقلیمی و فاکتورهای متغیر نور تعدیل شود. به بیان دیگر، شرایط مختلف محیطی و نیازهای خاص هر فضا می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر این نسبت داشته باشد و باید در طراحی‌ها لحاظ شود [۱۲-۱۳]. با بررسی مطالعات یادشده می‌توان به تأثیر شاخصه‌های تأثیرگذار پنجره از قبیل نوع کاربری، اقلیم، جهت تابش، اندازه و موقعیت پنجره بر میزان مصرف انرژی در بخش‌های سرمایش، گرمایش و روشنایی دست یافت. از همین رو و با توجه به کمبود سوخت‌های فسیلی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف آن و اهمیت هر چه بیشتر بهینه‌سازی مصرف انرژی به‌خصوص در کشور ایران یکی از راهکارهای مؤثر آن، تبدیل نور روز به نور غالب به وسیله بهینه‌یابی شاخصه‌های تأثیرگذار پنجره بر اساس فاکتورهای نوع کاربری، اقلیم مورد نظر و میزان تابش خورشید است که ثمره‌های آن، بهینه‌سازی میزان دریافت نور روز و کمینه‌سازی مصرف انرژی به وسیله کاهش بار مصرفی در قسمت‌های سرمایشی و گرمایشی و روشنایی الکتریکی در پنجره‌ها است. از همین رو در پژوهش حاضر شاخصه‌های تأثیرگذار پنجره برای جبهه شمالی ساختمان‌هایی با کاربری اداری و در اقلیم مورد نظر در بازه سالانه از لحاظ نور روز بهینه، همراه با مصرف انرژی بررسی شده است. همچنین، شاخصه و سناریوهای بهینه برای هر یک از موقعیت‌های پنجره معرفی و ارائه می‌شوند.

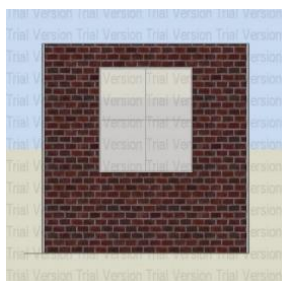
۲. روش‌شناسی

مطالعه حاضر به منظور استفاده بهینه از نور روز و صرفه‌جویی در مصرف انرژی در محیط نرم‌افزار دیزاین بیلدر انجام گرفته است. این نرم‌افزار از موتورهای معتبر رادیانس و دیسیم برای شبیه‌سازی نور روز و انرژی پلاس در محاسبات حرارتی و غیره بهره گرفته است. مراحل پژوهش به این صورت است که ابتدا با توجه مطالعات و مبانی نظری پژوهش به بررسی مفاهیم مربوط به نور روز و مصرف انرژی پرداخته می‌شود. سپس، متغیرهای مستقل (شکل، موقعیت، و نسبت سطح بازشو به سطح کف فضا) و متغیرهای وابسته (آسایش بصری و میزان مصرف انرژی) تعیین می‌شوند. با توجه به آنکه فضاهای اداری گستردگی متنوعی در شکل و ابعاد دارند، از فضای اقامت اصلی طبق مبحث چهارم مقررات ملی، به عنوان مدل مرجع برای ترسیم سناریوها در نرم‌افزار دیزاین بیلدر استفاده می‌شود. پس از شکل‌گیری سناریوها، آن‌ها را ابتدا بر اساس متغیر وابسته آسایش بصری بررسی می‌کنند و سپس مدل‌های برتر بر اساس استانداردهای آسایش بصری مشخص و انتخاب می‌شوند. پس از آن نیز سناریوهای برتر آسایش بصری را از لحاظ میزان مصرف انرژی بررسی می‌کنند و مدل‌های بهینه در هر موقعیت معرفی می‌شوند.

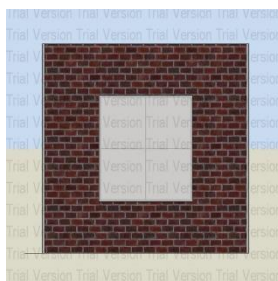
۲-۱. مشخصات نمونه مورد بررسی

گسترده‌ترین کاربری‌های ساختمانی به‌خصوص در تهران و سایر شهرها را ساختمان‌هایی با عملکرد اداری تشکیل داده‌اند. از همین رو و به دلیل گستردگی تنوع در شکل و اندازه فضاهای اداری و به منظور بررسی تأثیرات متغیرها و شبیه‌سازی سناریوها، باید از یک نمونه پایه برای بررسی این تأثیرات استفاده کرد. مدل مرجعی که به عنوان مدل پایه و برای تجزیه و تحلیل پارامترهای مورد ارزیابی استفاده شده، فضای اقامت اصلی طبق مبحث چهارم مقررات ملی ساختمانی ایران است [۱۴] که حداقل سطحی برابر با ۱۲ مترمربع دارد. برای اثربخش بودن نتایج نیز سعی شد از فرم و گونه‌شناسی رایج ساختمان‌های اداری یعنی فضایی به ابعاد ۳*۴ متر و ارتفاع مفید ۲/۸۵ متر استفاده شود، که با توجه به اصول طراحی معماری پایدار و همسو با اقلیم جبهه ۴ متری، جبهه دارای بازشو در نظر گرفته شد. سایر جبهه‌ها از جمله دیوارها، سقف و کف مدل اصلی، دیوار آدیاباتیک (در ارتباط با سایر فضاهای یک ساختمان) هستند و تنها یک دیوار برای تعبیه پنجره و تماس با محیط خارج در نظر گرفته شده است. نسبت سطح شیشه به کف (WFR) از ۱۰ تا ۹۰ درصد با بازه ۱۰ درصد تغییر می‌کند (با توجه به شکل و موقعیت پنجره). این پنجره‌ها در نمای شمالی با موقعیت قرارگیری در سه حالت بالا، مرکز و پایین نما در نظر گرفته شده‌اند. بر اساس مطالعات برای شکل پنجره پنج حالت به این صورت که چهار حالت با فرم مستطیلی شکل به نسبت‌های (۱ به ۲، ۱ به ۱/۵، ۱/۵ به ۱، ۱ به ۲) و یک حالت با فرم مربعی شکل با نسبت (۱ به ۱) است و در کل پنج حالت به دست می‌آید. که تنها ۹۱ سناریو با توجه به

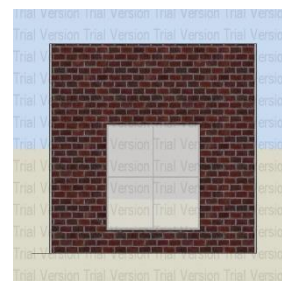
محدودیت ابعاد هر جداره قابلیت ارزیابی را پیدا کرده است. تصویرهای زیر متغیرهای موقعیت و نسبت‌های متفاوت مساحت پنجره به سطح کف را نشان می‌دهند. همچنین، تمامی تنظیمات شبیه‌سازی برای سناریوها یکسان و محاسبات خروجی‌ها در بازه سالانه انجام گرفته است. جدول ۱ مشخصات مدل مرجع و سایر سناریوها را در دیزاین بیلدر نمایش می‌دهد.



موقعیت بالا

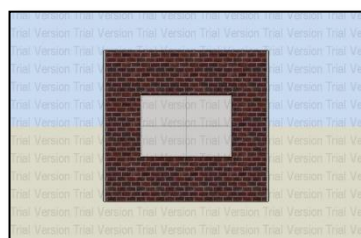


موقعیت وسط

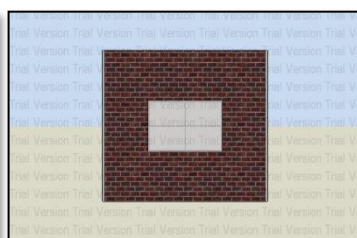


موقعیت پایین

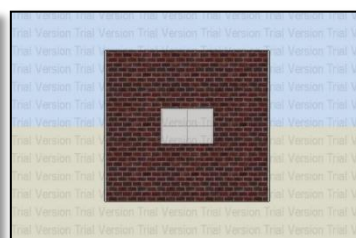
شکل ۱. نمایش موقعیت‌های مختلف پنجره‌ای با نسبت مساحت پنجره به کف ۳۰ درصد و شکل مربع



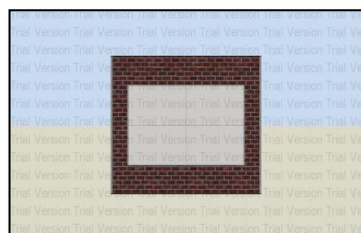
Center- WFR 30%



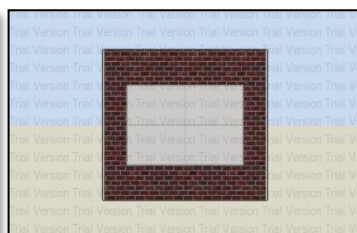
Center - WFR 20%



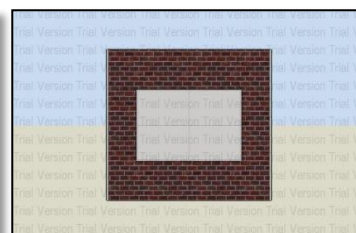
Center - WFR 10%



Center - WFR 60%



Center - WFR 50%



Center - WFR 40%



Center - WFR 90%



Center - WFR 80%



Center - WFR 70%

شکل ۲. نمایش نسبت‌های متفاوت سطح پنجره به کف در موقعیت مرکزی و فرم مستطیل شکل با نسبت (۱ به ۱/۵)

جدول ۱. مهم‌ترین مشخصات سناریوها در نرم‌افزار دیزاین بیلدر [۱۵]	
مقدار	آیتم
تهران	موقعیت مکانی در نظر گرفته شده
35.7219° N	عرض جغرافیایی
51.3347° E	طول جغرافیایی
Generic Office Area	نوع کاربری انتخابی
۰.۱۱۱۰	تراکم اشتغال (people/m2)
Heating(°c): 22.0 Heating set back(°c): 12.0	Setpoint گرمایش (°c)
Cooling(°c): 24.0 Cooling set back(°c): 28.0	Setpoint سرمایش (°c)
Fan coil unit	سیستم HVAC
U-VALUE:1.498[W/m2-k]	دیوار بیرونی
adiabatic	سایر جبهه‌ها
Dbl 6mm,13mm Air	مشخصات قسمت شفاف بازشو
Aluminium window Frame	مشخصات قسمت جداره بازشو

۲-۲. مطالعات اقلیمی تهران

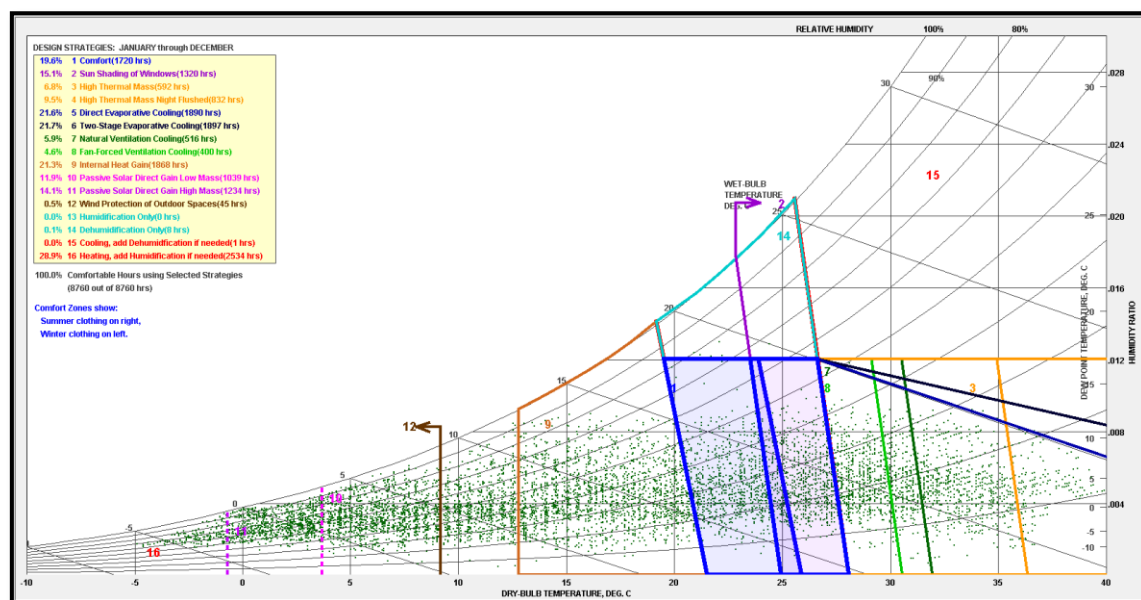
شهر تهران بین ۳۵ تا ۳۶/۵ درجه عرض شمالی و ۵۰ تا ۵۳ درجه طول شرقی و در دامنه جنوبی کوه‌های البرز و حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران در دشتی نسبتاً هموار واقع شده که شیب آن از شمال به جنوب است و ارتفاع آن در جنوب، ۱۱۰۰ متر؛ در نواحی مرکزی، ۱۲۰۰ متر و در شمال، ۱۷۰۰ متر است [۱۶]. میانگین ده‌ساله رطوبت نسبی بین ۲۰ تا ۶۱ درصد تغییر کرده که نشان‌دهنده خشکی نسبی هوا در ماه‌های گرم سال است. همچنین، میانگین بالاترین دمای ثبت‌شده طی ده سال در ایستگاه مهرآباد ۴۰/۸۷ در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد و پایین‌ترین آن نیز با منفی ۵/۷۸ در ماه‌های آذر، دی و بهمن بوده است. باد غالب سالانه تهران از سمت غرب و باد سرد و سریع آن، از سمت غرب و شمال غربی است. بر اساس این مشخصات، شهر تهران از نظر پهنه‌بندی اقلیمی ایران در اقلیم نسبتاً سرد، نیمه‌گرم و خشک قرار می‌گیرد [۱۷]. همچنین، طبق بررسی‌های صورت گرفته روی چارت سایکرومتریک تهران در نرم‌افزار کلایمت کانسالت^۱ که در شکل ۳ نمایش داده شده است، نتایج نشان از آن دارد که:

- حدود ۲۰ درصد از ایام سال شرایط آسایش حرارتی تهران به صورت طبیعی در محدوده مطلوب است.
- حدود ۳۷ درصد از ایام سال یعنی از ماه خرداد تا ماه شهریور می‌توان از طریق کنترل ورود نور روز به وسیله طراحی اقلیمی پنجره و تعبیه سایه‌بان (همچنین، با استفاده از جداره‌هایی با ظرفیت گرمایی بالا) در کنار استفاده از سیستم برودت تبخیری مستقیم، می‌توان در اقلیم تهران به محدوده آسایش حرارتی رسید.
- حدود ۳۴ درصد از ایام سال یعنی از ماه مهر تا اسفند برای آنکه فضای مورد نظر در اقلیم تهران به شرایط آسایش حرارتی برسد، نیاز است تا فضا به وسیله فراهم آوردن امکان ورود نور خورشید کافی در کنار استفاده از سیستم‌های مکانیکی گرم شود. باقی ایام سال نیز نیاز است تا به فراخور شرایط از تهویه طبیعی، سرمایش، گرمایش استفاده کرد تا بتوان به شرایط آسایش حرارتی مطلوب در تهران رسید.

۳. نتایج شبیه‌سازی

برای اندازه‌گیری نور واردشده از پنجره‌ها به فضا، از معیارها و استانداردهای مختلف استفاده می‌شود. به صورت کلی، ارزیابی روشنایی روز می‌تواند از طریق اندازه‌گیری میدانی یا شبیه‌سازی رایانه‌ای انجام گیرد. با پیشرفت نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، ارزیابی عملکرد ساختمان‌ها به کمک این روش در حال افزایش است. در شبیه‌سازی، ابتدا عواملی مانند هندسه فضا، ویژگی مصالح و منابع نوری، نوع کاربری و اقلیم مورد نظر به نرم‌افزار وارد می‌شود. سپس، حسگرهایی در ارتفاع مشخص قرار داده می‌شود تا داده‌های روشنایی جمع‌آوری و شاخص‌های نوری محاسبه شود. در نهایت، نتایج با مقادیر توصیه‌شده در استانداردها مقایسه شده

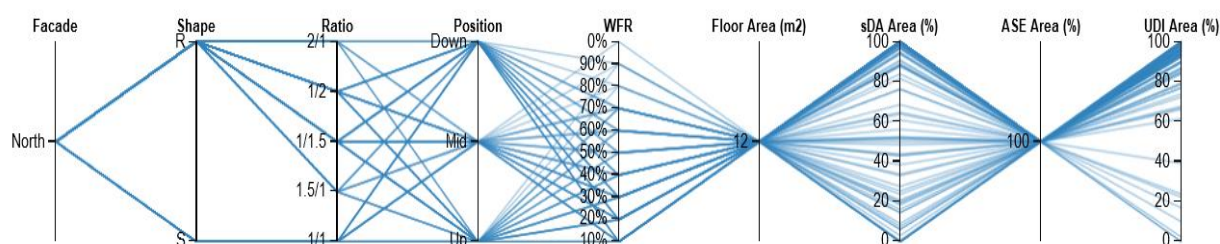
و میزان رضایت کاربر از فضا پیش‌بینی می‌شود. از همین‌رو، پس از تعیین سناریوها و شبیه‌سازی آن‌ها، به منظور انتخاب نتایج بهینه در شهر تهران، داده‌ها با محوریت دو محدوده شامل: ۱- عملکرد نور روز در بخش LEED v2, LEED v4 و شاخص فاکتور نور روز (DF) و ۲- مصرف انرژی در بخش سرمایش، گرمایش و مجموع سنجیده می‌شوند. با توجه به آنکه تمامی تنظیمات هنگام محاسبات مربوطه برای کلیه سناریوها یکسان در نظر گرفته شده است، نتایج خروجی‌ها ارائه می‌شود.



شکل ۳. نمودار سالانه سایکرومتریک تهران

۳-۱. ارزیابی سناریوها بر اساس LEED v4

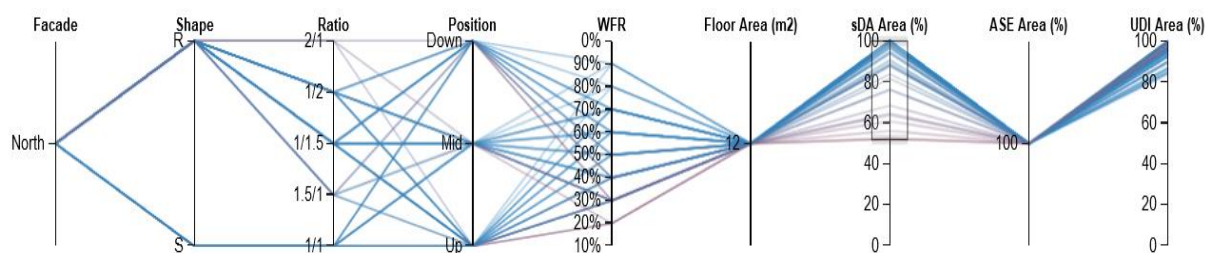
شاخص‌های دینامیک نور روز به سبب در نظر گرفتن پارامترهای طراحی، اقلیم و تغییرات وضعیت آسمان و به دنبال آن، تغییرات روشنایی بر اساس داده‌های هواشناسی، ارزیابی شرایط نوری فضا و آسایش بصری را طی سال برای کاربران امکان‌پذیر می‌کنند. جامعیت بیشتر این نتایج به علت در نظر گرفتن تغییرات آب‌وهوایی هنگام شبیه‌سازی است. شکل ۴ خروجی سناریوها بر اساس پارامترهای دینامیک نور روز و با اعمال تنظیمات همسان برای سناریوها را در نمای شمالی نشان می‌دهد.



شکل ۴. ارزیابی سناریوهای بر اساس استاندارد LEEDV4 (تجزیه و تحلیل در محیط Design-Explorer)

به منظور ارتباط ساختمان با فضای خارج و کاهش استفاده از روشنایی الکتریکی با ورود نور روز به فضا از گواهینامه LEED v4 استفاده می‌شود. برای پذیرش این گواهینامه شاخص اتانومی نور روز فضایی (sDA 300lux/50%) با شرط حداقل ۵۵، ۷۵ یا ۹۰ درصد از سطح کف اشغال شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با انتخاب دامنه تعریف شده در شاخص (sDA) داده‌های به دست آمده زیر حائز شرایط هستند، البته، تابش سالانه نور خورشید (ASE 1000lux, 250hour) با محدودیت سطح کف اشغال شده بیش از

۱۰ درصد نیز در این استاندارد تأثیرگذار است که به علت آنکه در نمای شمالی نور مستقیم خورشید در ساعت‌های مورد نظر و با توجه به دیاگرام خورشیدی سبب ایجاد مزاحمت نمی‌شود، در سناریوهای منتخب تأثیری نداشت.

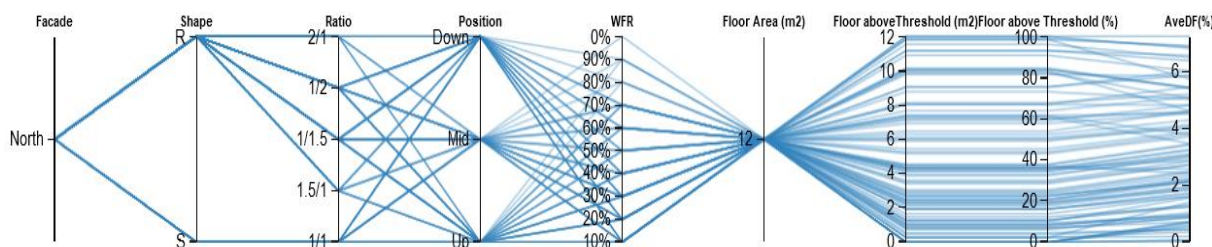


شکل ۵. سناریوهای منتخب نمای شمالی بر اساس استاندارد LEEDV4

به صورت کلی و با توجه به فراوانی داده‌های هر بخش می‌توان این‌گونه استنباط کرد که پنجره با نسبت سطح پنجره به سطح کف ۴۰ درصد به بالا، و شکل مستطیل (نسبت ۱/۱٫۵ و ۱/۲) در موقعیت بالا و سپس، مرکز به دلیل فراوانی بیشتر، اکثریت دامنه بهینه متغیرها با توجه به استاندارد LEED v4 را در نمای شمال تشکیل می‌دهند.

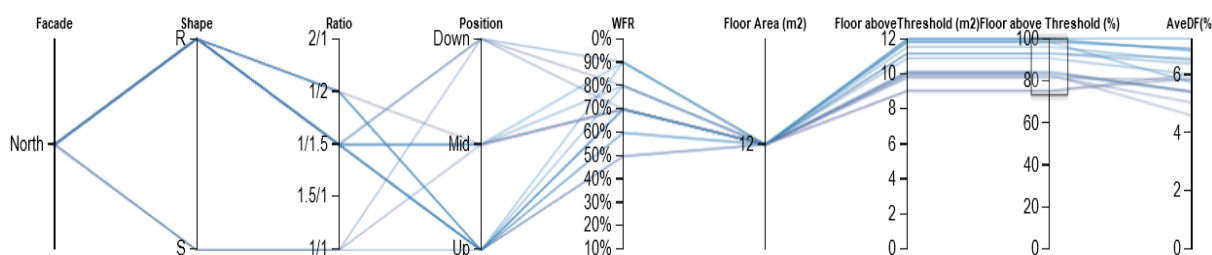
۳-۲. ارزیابی سناریوها بر اساس LEED v2

داده‌های خروجی از نرم‌افزار دیزاین بیلدر طبق استاندارد LEED v2 CREDIT 8.1 در شکل ۶ نمایان است. شرایط مورد قبول برای این حالت، به دست آوردن حداقل ۷۵ درصد از مساحت فضاهای اشغال شده است که به اندازه کافی دارای نور روز باشند. همچنین، شدت روشنایی بیش از حداقل مقدار آستانه باشد. هدف این استاندارد، شناخت سناریوهایی است که سطح مناسبی از نور روز را برای ساکنان ساختمان فراهم می‌کند.



شکل ۶. ارزیابی کلیه سناریوها بر اساس استاندارد LEEDV2

با اضافه کردن استاندارد LEED v2 (حداقل ۷۵ درصد از مساحت فضاهای اشغال شده است که به اندازه کافی دارای نور روز باشند) به داده‌های خروجی گرفته شده فوق تنها سناریوهای مورد بررسی در شکل ۷ می‌توانند شرایط پذیرش این استاندارد را دریافت کنند.



شکل ۷. سناریوهای منتخب بر اساس استاندارد LEEDV2

شکل ۷ سناریوهای دارای استاندارد LEEDV2 را نمایش می‌دهد و همان‌گونه که می‌توان مشاهده کرد، میانگین فاکتور نور روز (Ave DF) تمامی این داده‌ها بیشتر از حداقل میزان مورد نیاز یعنی ۲ درصد است، ولی فاکتور نور روز (DF) بیشتر از ۵ درصد یعنی اتاق به‌شدت روشنی روز دارد و روشنایی الکتریکی هنگام روز به‌ندرت مورد نیاز است، ولی عامل بالقوه برای مصرف انرژی، گرمای بیش از حد در تابستان و تلفات حرارتی در فصل زمستان است. از این‌رو، دامنه بهینه پارامتر متوسط نور روز (DF) را به تصویر ۶ اضافه می‌شود. جدول ۲ الگوی بهینه از نظر استاندارد LEEDV2 و فاکتور نور روز (DF) را نمایش می‌دهد.

جدول ۲. سناریوهای دارای استاندارد DF & LEEDV2

نما	شکل	نسبت	موقعیت	نسبت باز شو به سطح کف (WFR)	Floor Area above Threshold (m2)	Floor Area above Threshold (%)	Average Daylight Factor (%)
شمال	مستطیل	1/2	بالا	50%	9.969	83.077	4.608

با توجه به جدول ۲ می‌توان گفت که تنها مدل بهینه بر اساس میزان دریافت نور روز مناسب (DF) و LEEDV2 در جهت شمال پنجره‌ای است با 50% WFR، و همچنین موقعیت بهینه برای آن نیز موقعیت بالا (لبه بالای پنجره هم‌تراز با زیر سقف) است، که با شکل مستطیل و نسبت ۱ به ۲ سبب می‌شود که شرایط بهینه با توجه به این استاندارد به دست آید.

۳-۳. ارزیابی بر اساس مصرف سوخت سالیانه

افزایش رشد سالانه مصرف انواع انرژی در ایران، مشکلات زیست‌محیطی همچون آلودگی هوا و گرمای هوا، ائتلاف انرژی در مصرف ضرورت مدیریت مصرف و بالا بردن بازده و بهره‌وری انرژی را پیش از پیش آشکار ساخته است. از همین‌رو، گرچه تا کنون بهینه‌ترین نتایج بر اساس پارامترهای دینامیک و استاتیک نور روز معرفی شده‌اند، ولی با هدف بررسی میزان مصرف انرژی کلیه مدل‌های بهینه در بخش روشنایی روز مورد سنجش مجدد از بعد سرمایش، گرمایش و مجموع قرار گرفته‌اند.

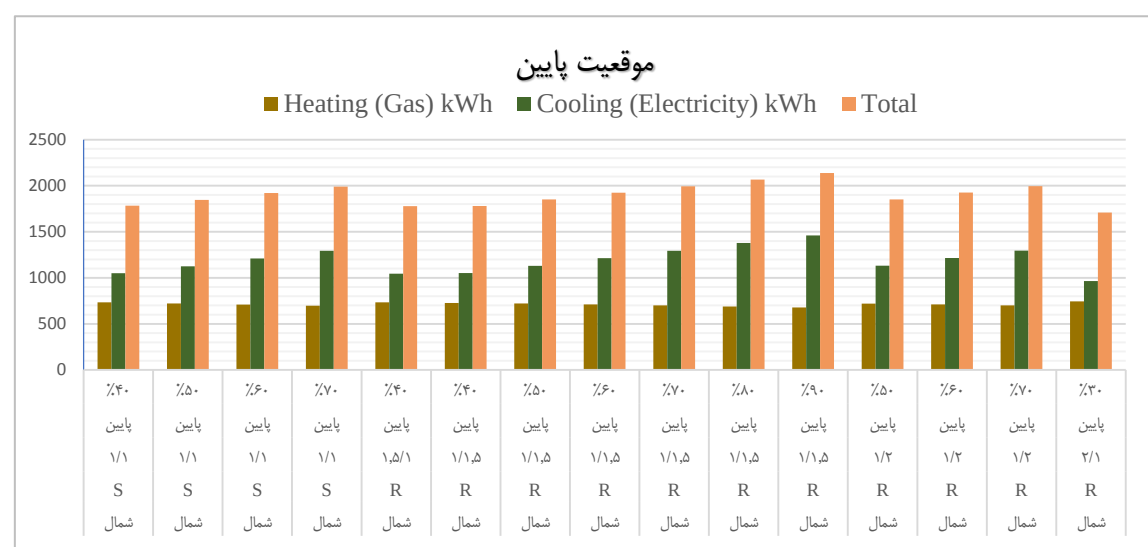
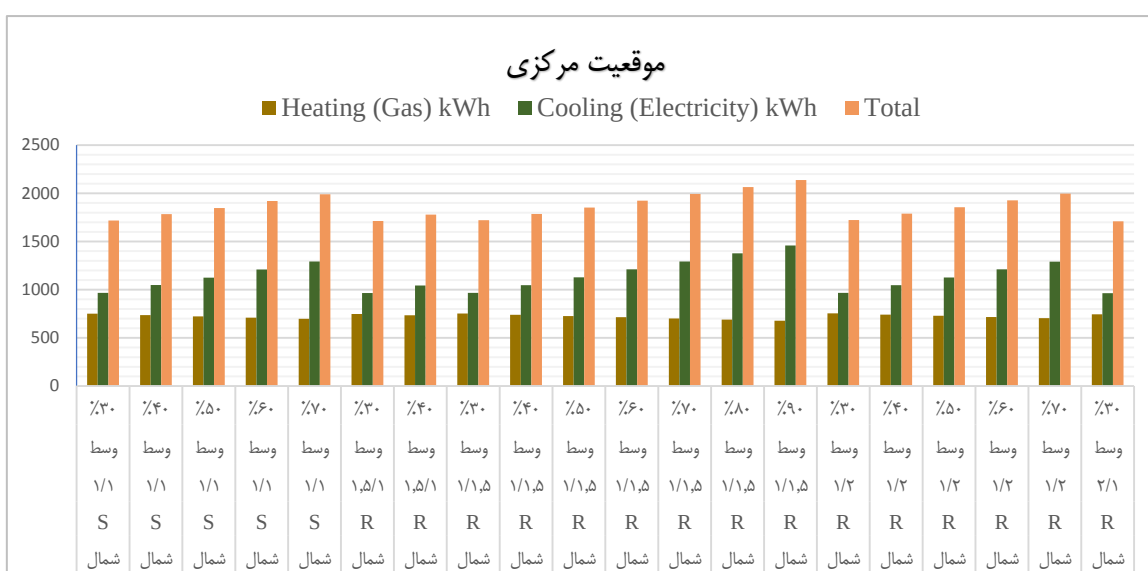
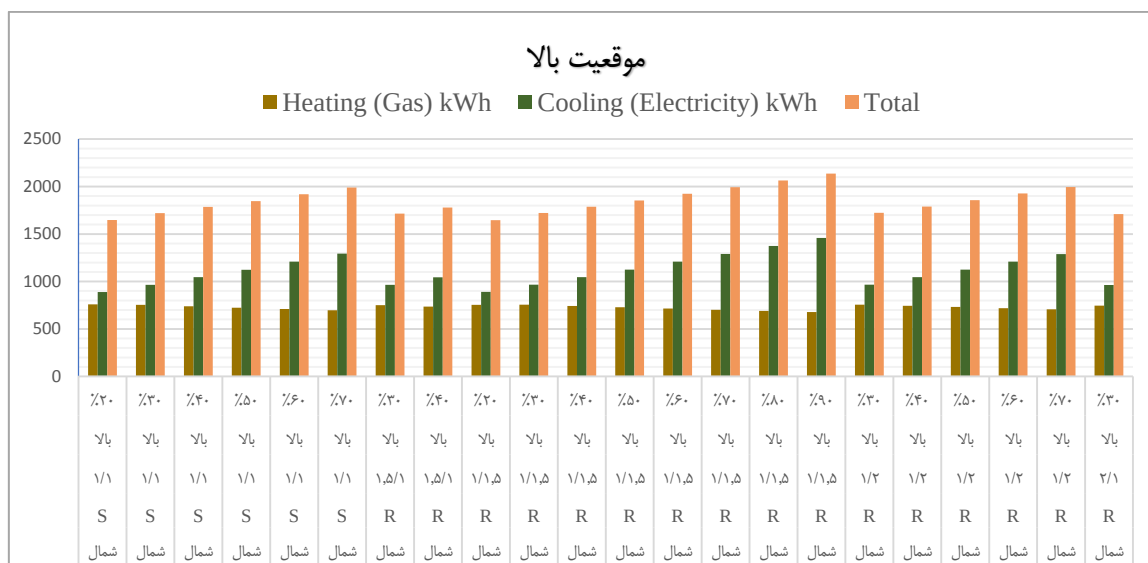
جدول ۳. مجموع سناریوهای دارای استاندارد (LEEDV4) و (DF & LEEDV2)

نما	شکل	نسبت (x/y)	موقعیت	نسبت پنجره به سطح کف
شمال	مربع	1/1	بالا	20%
شمال	مربع	1/1	بالا	30%
شمال	مربع	1/1	بالا	40%
شمال	مربع	1/1	بالا	50%
شمال	مربع	1/1	بالا	60%
شمال	مربع	1/1	بالا	70%
شمال	مربع	1/1	وسط	30%
شمال	مربع	1/1	وسط	40%
شمال	مربع	1/1	وسط	50%
شمال	مربع	1/1	وسط	60%
شمال	مربع	1/1	وسط	70%
شمال	مربع	1/1	پایین	40%
شمال	مربع	1/1	پایین	50%
شمال	مربع	1/1	پایین	60%
شمال	مربع	1/1	پایین	70%
شمال	مستطیل	1.5/1	بالا	30%
شمال	مستطیل	1.5/1	بالا	40%
شمال	مستطیل	1.5/1	وسط	30%
شمال	مستطیل	1.5/1	وسط	40%
شمال	مستطیل	1.5/1	پایین	40%
شمال	مستطیل	1/1.5	بالا	20%

ادامهٔ جدول ۳. مجموع سناریوهای دارای استاندارد (LEEDV4) و (LEEDV2 & DF)

نسبت پنجره به سطح کف	موقعیت	نسبت (x/y)	شکل	نما
30%	بالا	1/1.5	مستطیل	شمال
40%	بالا	1/1.5	مستطیل	شمال
50%	بالا	1/1.5	مستطیل	شمال
60%	بالا	1/1.5	مستطیل	شمال
70%	بالا	1/1.5	مستطیل	شمال
80%	بالا	1/1.5	مستطیل	شمال
90%	بالا	1/1.5	مستطیل	شمال
30%	وسط	1/1.5	مستطیل	شمال
40%	وسط	1/1.5	مستطیل	شمال
50%	وسط	1/1.5	مستطیل	شمال
60%	وسط	1/1.5	مستطیل	شمال
70%	وسط	1/1.5	مستطیل	شمال
80%	وسط	1/1.5	مستطیل	شمال
90%	وسط	1/1.5	مستطیل	شمال
40%	پایین	1/1.5	مستطیل	شمال
50%	پایین	1/1.5	مستطیل	شمال
60%	پایین	1/1.5	مستطیل	شمال
70%	پایین	1/1.5	مستطیل	شمال
80%	پایین	1/1.5	مستطیل	شمال
90%	پایین	1/1.5	مستطیل	شمال
30%	بالا	1/2	مستطیل	شمال
40%	بالا	1/2	مستطیل	شمال
50%	بالا	1/2	مستطیل	شمال
60%	بالا	1/2	مستطیل	شمال
70%	بالا	1/2	مستطیل	شمال
30%	وسط	1/2	مستطیل	شمال
40%	وسط	1/2	مستطیل	شمال
50%	وسط	1/2	مستطیل	شمال
60%	وسط	1/2	مستطیل	شمال
70%	وسط	1/2	مستطیل	شمال
50%	پایین	1/2	مستطیل	شمال
60%	پایین	1/2	مستطیل	شمال
70%	پایین	1/2	مستطیل	شمال
30%	بالا	2/1	مستطیل	شمال
30%	وسط	2/1	مستطیل	شمال
30%	پایین	2/1	مستطیل	شمال

نتایج حاصل از بررسی میزان مصرف سرمایش، گرمایش و مجموع برای سناریوهای دارای استانداردهای نوری بر اساس موقعیت بازشو (بالایی، مرکزی، پایینی) به شرح شکل ۸ است:



شکل ۸. میزان مصرف انرژی سالیانه سرمایش، گرمایش و مجموع مدل‌های بهینه نور روز بر اساس موقعیت (ترتیب Legend از پایین به بالا: جبهه، شکل، نسبت، موقعیت و نسبت WFR)

به صورت کلی و بر اساس فراوانی داده‌های بهینه می‌توان گفت که موقعیت بهینه برای بازشوها به ترتیب بالا، مرکزی و سپس پایین است. در ادامه، به معرفی و بررسی مدل‌های بهینه در هر سه موقعیت بالا، مرکز و پایین پرداخته می‌شود:

۳-۳-۱. موقعیت بالا

در جهت‌گیری شمال و موقعیت بالا بازشو مدل (شمال، مستطیل، ۱/۱،۵ و ۲۰٪) کمترین مقدار مصرف انرژی به صورت مجموع (۱۶۴۵،۱۸ kWh) را به خود اختصاص داده است. همچنین، بازشو (شمال، مربع، ۱/۱ و ۲۰ درصد) با میزان مصرف مجموع (۱۶۴۸،۳۲ kWh) موقعیت مناسبی را نیز دارد. همچنین، مدل (شمال، مستطیل، ۱/۲، ۵۰ درصد) با مصرف انرژی به صورت مجموع (۱۸۵۶،۶۵ kWh) تنها بازشویی در بین کل سناریوها است که استانداردهای LEED v2/v4 و DF را به صورت هم‌زمان دارد، که به دلیل این ویژگی در جدول نتایج سناریوهای برتر در قسمت نتیجه‌گیری اضافه شده است. به طور کلی، با افزایش نسبت WFR، بار سرمایشی از روندی رو به رشد (به شرط ثابت بودن شکل و نسبت) برخوردار است. این در حالی است که با افزایش WFR بار گرمایشی روند کاهشی (همان فرض) را در موقعیت بالا به خود می‌گیرد.

۳-۳-۲. موقعیت مرکزی

در موقعیت مرکزی و جهت‌گیری شمال بازشو مدل (شمال، مستطیل، ۲/۱ و ۳۰ درصد) کمترین میزان مصرف انرژی به صورت مجموع (۱۷۰۹،۴۳ kWh) را به خود اختصاص داده است. همچنین، بازشو (شمال، مستطیل، ۱،۵/۱ و ۳۰ درصد) با انرژی مصرفی مجموع (۱۷۱۲،۷۶ kWh) موقعیت مناسبی را در رده بعدی دارد. در موقعیت مرکزی نیز با افزایش نسبت WFR با فرض ثابت بودن نسبت و شکل بازشو میزان انرژی مصرفی گرمایشی روند کاهشی و میزان مصرف بار سرمایشی، افزایشی خواهد بود.

۳-۳-۳. موقعیت پایین

کمترین میزان فراوانی داده‌های دارای استانداردهای نوری متعلق به بازشوهای با موقعیت پایینی است. به صورت کلی در جهت‌گیری شمال و موقعیت پایین بازشو مدل (شمال، مستطیل، ۲/۱ و ۳۰ درصد) کمترین میزان مصرف انرژی به صورت مجموع (۱۷۰۸،۳۰ kWh) را به خود اختصاص داده است، همچنین، بازشو (شمال، مستطیل، ۱،۵/۱ و ۴۰ درصد) با انرژی مصرفی مجموع (۱۷۷۸،۴۱ kWh) موقعیت مناسبی را در رده بعدی نیز دارد.

جدول ۴. سناریوهای برتر با توجه به ارزیابی انجام‌شده بر اساس استانداردهای نوری و مصرف انرژی سالیانه

Model	Position	DF _{average} (%)	Floor Area above Threshold (%)	sDA _{300lx} (%)	ASE _{1000lx} (%)	Cooling (Electricity) (kWh)	E _{Total} (kWh)
شمال، مستطیل، ۱/۱،۵ و ۲۰٪	بالا	۱،۵۵۷	۱۰	۵۶،۲	۱۰۰	۸۹۰،۶۵	۱۶۴۵،۱۸
شمال، مربع، ۱/۱ و ۲۰٪	بالا	۱،۶۸۹	۱۶،۱۵۴	۶۰،۸	۱۰۰	۸۸۹،۱۸	۱۶۴۸،۳۲
شمال، مستطیل، ۱/۲ و ۵۰٪	بالا	۴،۶۰۸	۸۳،۰۷۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۱۲۴،۴۸	۱۸۵۶،۶۵
شمال، مستطیل، ۲/۱ و ۳۰٪	مرکزی	۲،۲۵۲	۲۲،۳۰۸	۶۸،۵	۱۰۰	۹۶۴،۲۳	۱۷۰۹،۴۳
شمال، مستطیل، ۱،۵/۱ و ۳۰٪	مرکزی	۲،۴۴۸	۲۴،۶۱۵	۷۶،۲	۱۰۰	۹۶۵،۴۳	۱۷۱۲،۷۶
شمال، مستطیل، ۲/۱ و ۳۰٪	پایین	۲،۱۵۲	۲۰،۷۶۹	۶۴،۶	۱۰۰	۹۶۴،۷۰	۱۷۰۸،۳۰
شمال، مستطیل، ۱،۵/۱ و ۴۰٪	پایین	۲،۹۶۷	۳۳،۰۷۷	۹۳،۸	۱۰۰	۱۰۴۴،۵۴	۱۷۷۸،۴۱

۴. نتیجه‌گیری

توجه به آسایش بصری و پارامترهای مرتبط در بازشوها تأثیر به‌سزایی در تبدیل نور روز به نور غالب، سلامتی کاربران و بهره‌برداران محیط و کاهش مصرف انرژی در قسمت روشنایی و آسایش حرارتی را دارد، که به موجب آن، سبب بهینه‌سازی انرژی مصرفی در یک ساختمان می‌شود. این پژوهش با بررسی شاخصه‌های بازشو شامل شکل و نسبت بازشو (مربع و مستطیل)، موقعیت و نسبت مساحت پنجره به سطح کف در پی بهینه‌سازی بازشوها جهت دریافت نور روز کافی و مطلوب به همراه مصرف انرژی بهینه برای ساختمان‌های با کاربری اداری در تهران است که با استفاده از روش شبیه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر انجام

شده است. سپس، بعد از طی مراحل خروجی‌ها به منظور کنترل و پاسخ به اهداف پژوهش مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. پس از انتخاب مدل مرجع و فرایند شبیه‌سازی، داده‌ها بر پایه عملکرد نور روز تجزیه و تحلیل شدند که به بررسی نتایج پرداخته شد. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی نور روز با شاخص‌های مربوط به آن نشان‌دهنده تأثیر مطلوب مؤلفه‌های پنجره و گزینش مدل‌هایی است که شرایط این معیارها را به دست آورند. مؤلفه نسبت مساحت پنجره به سطح کف و موقعیت بازشو در انتخاب مدل‌های بهینه و میزان نور روزی که به سطح اتاق در فاصله 0.75 متر از سطح زمین می‌رسد (ارتفاع سطح میز کار) نقش تأثیرگذاری را دارند. در انتخاب مدل‌های بهینه با شرایط LEED v2 و DF تنها یک مدل حائز شرایط بود و در استاندارد LEED v4 و به علت عدم تابش مستقیم نور خورشید، بیشترین تأثیر را شاخص sDA دارد، که نتایج بهینه هر قسمت به تفصیل مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین، بررسی نتایج حاصل از مصرف سوخت سالیانه، حاکی از آن است که بین شاخصه نسبت مساحت پنجره به کف و میزان مصرف انرژی سرمایشی و مجموع رابطه‌ای مستقیم وجود دارد، به گونه‌ای که سیستم باید انرژی بیشتری مصرف کند تا دمای داخل محیط به نقطه آسایش برسد تا ساکنان احساس رضایت کنند.

با توجه به نتایج پژوهش در موقعیت بالا جداره شمالی، پنجره مستطیل افقی (با نسبت $1/1.5$) و نسبت $WFR20\%$ گزینه کارایی برای پنجره ساختمان‌های اداری تهران بر اساس استاندارد (LEED v4) و مصرف انرژی است. البته، درخور یادآوری است که بازشوی مستطیلی افقی با نسبت $1/2$ و $WFR50\%$ از لحاظ استانداردهای نور روز (LEED v2/v4 و DF) نتایج بهتری را با کمی مصرف بیشتر انرژی کسب کرده است و می‌تواند در موقعیت بالای جداره شمالی نیز جزء گزینه‌های ایده‌آل محسوب شود. همچنین، در موقعیت مرکزی و پایینی جداره شمالی، بازشو مستطیل عمودی با نسبت $(2/1)$ و $WFR30\%$ گزینه کارایی برای پنجره ساختمان‌های اداری تهران بر اساس استاندارد (LEED v4) و مصرف انرژی محسوب می‌شود.

همان‌گونه که می‌توان دریافت، توجه به پارامترهای بازشو هنگام طراحی ساختمان بسیار اهمیت دارد و بهتر است که ساختمان‌ها دارای راه حل‌های خاصی برای پاسخ‌گویی به شرایط اقلیمی باشند. توجه به پارامترهای پنجره می‌تواند به عنوان یک راه‌حل اثرگذار محسوب شود. از این‌رو، در ساختمان‌های اداری و با توجه به فراوانی زیاد این کاربری و زمان نسبتاً زیادی که افراد در آن سپری می‌کنند، نصب پنجره مناسب با رویکرد دریافت مناسب و کافی روشنایی روز، می‌تواند استراتژی مناسب و به صرفه‌ای به منظور تأمین آسایش بصری و کاهش مصرف انرژی برای کاربران و فعالان این حوزه محسوب شود.

منابع

- [1] Shafavi Moghadam, N, Zomordian, Z, Tahsildoost, M. The effectiveness of daylight indicators in estimating sufficient lighting in space based on user evaluation, a case study: educational spaces of architecture schools in Tehran. Soffeh, *Journal of architecture and urban planning*; Vol. 29, no. 3, pp. 37-56. 2019. doi:10.29252/soffeh.29.3.37. [Persian]
- [2] Zeinalzadeh, A., Nikghadam, N., Fayyaz, R. The role of heat and lighting in optimizing north and south windows. *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 30, no. 1, pp. 13-23. 2019. doi:10.30506/mmep.2021.522753.1890. [Persian]
- [3] Yu X, Su Y. Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation – A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 52, pp. 494-503. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.142>.
- [4] Konstantzos I, Sadeghi SA, Kim M, Xiong J, Tzempelikos A. The effect of lighting environment on task performance in buildings – A review. *Energy and Buildings*. Vol. 226, pp. 110394. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110394>
- [5] Miri M, Saeed MK. Assessing Daylight Access Requirements in Iranian National Building Code (Case Study in Qazvin). *Journal of Architect, Urban Design & Urban Planning*. Vol. 7, no. 12, pp. 109-123. 2014. Access to: https://www.armanshahrjournal.com/article_39226_en.html?lang=en.
- [6] Marouf, N., Mahdavinejad., M. J., Moradinasab, H. Evaluation of the effect of window form on the light quality of educational spaces in BWk climate. *Climatological Research*, Vol. 43, pp. 127-142. 2020. Access to: https://clima.irimo.ir/article_126024.html [Persian].
- [7] Acosta I, Campano MA, Molina JF. Window design in architecture: Analysis of energy savings for lighting and visual comfort in residential spaces. *Applied Energy*. Vol. 168, pp. 493-506. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.005>
- [8] Fasi MA, Budaiwi IM. Energy performance of windows in office buildings considering daylight integration and visual comfort in hot climates. *Energy and Buildings*. Vol. 108, pp. 307-316. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.024>
- [9] Pellegrino A, Cammarano S, Lo Verso VRM, Corrado V. Impact of daylighting on total energy use in offices of varying architectural features in Italy: Results from a parametric study. *Building and Environment*. Vol. 113, pp. 151-162. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.012>
- [10] Vanhoutteghem L, Skarning GCJ, Hviid CA, Svendsen S. Impact of façade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses. *Energy and Buildings*. Vol. 102, pp. 149-156. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.018>
- [11] Choi W-K, Lee Y-J, Lee H-S, Eom J-Y, Lee C-K. The verification about possibility of introducing Window to Floor Ratio as design index for building energy performance. 2017. <https://doi.org/10.12813/kieae.2017.17.1.023>.
- [12] Nedhal A-T, Syed FSF, Adel A. Relationship between window-to-floor area ratio and single-point daylight factor in varied residential rooms in Malaysia. *Indian Journal of Science and Technology*. Vol. 9, no. 33, pp. 22-30. 2016. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i33/86216,
- [13] Mokhtari, R., Dehghan, N., and Maleki, A.. "Analysis of The Impact of Window Properties On the Main Living Space with The Aim of Daylight Efficiency and Energy Saving in The Hot and Dry Climate of Isfahan", *Journal of Solar Energy Research*, Vol. 8, no. 1, PP. 1235-1249. 2023. <https://doi.org/10.22059/jser.2022.349312.1258>
- [14] M.o.R.a.U.D.D.o.h.a. Construction, Iran's National Building Regulations and Laws, Book no. 4, General Building Requirements, 2013. Access to: https://jser.ut.ac.ir/article_90081.html
- [15] Pourahmad, A. The role of climate and geographical structure in air pollution in Tehran. *Geographical Research*. 1998, [Persian]. Access to: https://jrg.ut.ac.ir/article_17228.html
- [16] Mokhtari, R., and Rezaei, H. "Optimization of southern facade openings of Tehran office buildings based on visual comfort and energy consumption reduction", *Climatological Research*, Vol. 59, no. 59, pp. 147-159. 2024. doi: 10.22034/jcr.2025.213652
- [17] Mofidi, S.M., Hosseini, S. B., and Madi, H. "Investigation of the climatic performance of interior skylights of office buildings (Case study: Model buildings in the climatic zone of Tehran)", *Iranian Architecture and Urbanism (JIAU)*, Vol. 1, no. 1, pp. 101-108. 2010. doi: 10.30475/isau.2010.61929 [Persian]