

Optimising Energy Performance and Thermal Comfort with Shading Control Scenarios in Bandar Abbas, Yazd, Sari, and Tabriz Using Parametric Analysis and Machine-Learning

Fateme Akhlaghinezhad

PhD Candidate, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Hadi Bagheri Sabzevar, PhD. * 

Assistant Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Received: November 19, 2023

Accepted: May 15, 2024

(Pages: 25-54)

Fateme Akhlaghinezhad, Hadi Bagheri Sabzevar, 2025. Optimising Energy Performance and Thermal Comfort with Shading Control Scenarios in Bandar Abbas, Yazd, Sari, and Tabriz Using Parametric Analysis and Machine-Learning. *Soffeh* 35 (3): 25-54.

DOI: [10.48308/SOFFEH.2025.233623.1300](https://doi.org/10.48308/SOFFEH.2025.233623.1300)

Abstract:

Background and objectives: The growing demand for energy efficiency in buildings has become a central objective for sustainable development, as the building sector is expected to significantly raise its share of global energy consumption by 2040. Shading systems can therefore play a crucial role by controlling solar heat gain, and thus reducing the cooling and heating loads. This study aims to identify optimal shading control strategies by considering variables such as shading position, building orientation, and climate conditions. EnergyPlus and jEPlus are employed here for parametric modelling and optimisation of various shading

Keywords:

Shading control, Energy consumption, Thermal and visual comfort, EnergyPlus, Random Forest machine learning, SHAP algorithm.



SOFFEH

Soffeh Journal, Shahid Beheshti University, Vol. 35, Issue 3, No. 110, 2025

 ISSN: 1683-870X

*. Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*. Corresponding Author Email Address: h.bagheri@hsu.ac.ir

<http://dx.doi.org/10.48308/SOFFEH.2025.233623.1300>

scenarios across four Iranian cities: Bandar Abbas, Yazd, Sari, and Tabriz. The primary objective is to reduce energy consumption and enhance both thermal and visual comfort for occupants, with a specific focus on assessing the impact of appropriate shading control strategies in achieving these goals.

Materials and Methods: This study utilises a standard residential room model similar to Test Case 600, as outlined in the ANSI/ASHRAE 140-2017 standard. A total of 19 different shading control scenarios were analysed, incorporating varieties in shading position (internal or external), building orientation, shading control strategies, activation thresholds, and climate conditions. The predictive variables considered include cooling load, heating load, electrical lighting load, total energy consumption, and the number of hours of thermal discomfort (PPD index) and visual discomfort (DGI index) experienced by the occupants. Energy modelling was performed using EnergyPlus, while parametric design optimisation is conducted with jEPlus. To predict energy consumption and assess the influence of various parameters, a Random Forest machine learning model was employed. Additionally, the SHAP (SHapley Additive exPlanations) algorithm was used to interpret the model's predictions, providing a detailed understanding of the contribution of each input variable.

Results and conclusion: The results demonstrate that optimised shading control strategies can significantly reduce energy consumption. In the summer, total energy use decreased by 18.8% in Bandar Abbas, 35.2% in Yazd, 37.8% in Sari, and 45.5% in Tabriz. In winter, reductions ranged from 0.8% in Yazd to 4.3% in Bandar Abbas. Additionally, optimised shading design and control led to a substantial reduction in both thermal and visual discomfort. For instance, in Tabriz, thermal discomfort decreased by 64.2%, while visual discomfort was reduced by up to 100% across all cities. The study concludes that selecting the appropriate shading control strategy and activation threshold not only reduces energy consumption but also enhances both thermal and visual comfort for building occupants. Specifically in the summer, external shading with outdoor temperature control in Bandar Abbas, and external shading with indoor temperature control in Yazd and Tabriz, were identified as the most effective strategies for reducing energy consumption and improving comfort. In winter, the most effective strategy involves controls based on outdoor temperature, with varying activation thresholds tailored to each climate. Overall, the study emphasises the critical importance of climate-adapted control strategies in designing energy-efficient and comfortable residential buildings, thereby contributing to the advancement of sustainable architecture across diverse climatic regions.

کاهش مصرف انرژی و بهبود آسایش حرارتی و بصری در خانه‌ها با سناریوهای کنترل سایه‌بان:

تحلیل پارامتریک و بهینه‌سازی با یادگیری ماشین در بندرعباس، یزد، ساری، و تبریز

فاطمه اخلاقی نژاد^۱



هادی باقری سبزواری^۲

استادیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

دریافت: ۲۸ آبان ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۳

(صفحه ۲۵-۵۴)

فاطمه اخلاقی نژاد، هادی باقری سبزواری. ۱۴۰۴. کاهش مصرف انرژی و بهبود آسایش حرارتی و بصری در خانه‌ها با سناریوهای کنترل سایه‌بان: تحلیل پارامتریک و بهینه‌سازی با یادگیری ماشین در بندرعباس، یزد، ساری، و تبریز. فصلنامه علمی معماری و شهرسازی صفة ۳۵ (۳): ۲۵-۵۴.

کلیدواژگان: کنترل سایه‌بان، مصرف انرژی، آسایش حرارتی و بصری، انرژی پلاس، یادگیری ماشین، جنگل تصادفی، الگوریتم SHAP.

چکیده

اهداف و پیشینه: پیش‌بینی می‌شود که با افزایش چشمگیر مصرف انرژی در بخش ساختمان‌ها تا سال ۲۰۴۰، بهینه‌سازی مصرف انرژی در این بخش یکی از اهداف اصلی در زمینه توسعه پایدار گردد. در این زمینه، طراحی سیستم‌های سایه‌بان، که ابزاری است برای کنترل تابش خورشیدی و کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی، نقشی حیاتی در ارتقای کارایی انرژی دارد. هدف اصلی در این مطالعه، شناسایی استراتژی‌های کنترلی بهینه سایه‌بان‌ها با در نظر گرفتن عوامل مختلف مانند موقعیت سایه‌بان، جهت‌گیری ساختمان، و شرایط اقلیمی است. در این تحقیق، با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای انرژی پلاس و جی‌پلاس، سناریوهای مختلف طراحی سایه‌بان به‌صورت پارامتریک در چهار شهر با اقلیم‌های متفاوت (بندرعباس، یزد، ساری، و تبریز) مدل‌سازی و بهینه‌سازی شده‌اند. هدف نهایی در این پژوهش، یافتن سناریویی برای کاهش مصرف انرژی و ارتقای آسایش حرارتی و بصری کاربران است و تمرکز اصلی بر ارزیابی تأثیر انتخاب استراتژی کنترلی مناسب سایه‌بان‌ها در دستیابی به اهداف است.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق از مدل استاندارد اتاق مسکونی مشابه نمونه ۶۰۰ مطابق با استاندارد ANSI/ASHRAE 140-2017 استفاده شده است. در این مطالعه، ۱۹ سناریوی مختلف برای کنترل سایه‌بان‌ها بررسی گردیده که ترکیبی از موقعیت سایه‌بان (داخلی و خارجی)، جهت‌گیری ساختمان، استراتژی‌های کنترلی سایه‌بان، نقاط تنظیم، و شرایط اقلیمی هستند. متغیرهای خروجی شامل بار سرمایشی، بار گرمایشی، بار الکتریکی روشنایی، مصرف کل انرژی، و ساعات نارضایتی حرارتی و بصری ساکنان می‌شوند. مدل‌سازی انرژی با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس انجام شده و برای تحلیل و بهینه‌سازی طراحی، از ابزار جی‌پلاس استفاده شده است. برای پیش‌بینی مصرف انرژی ساختمان و ارزیابی تأثیر متغیرهای مختلف، مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی به کار رفته است و برای تفسیر نتایج و تعیین میزان اهمیت هر ویژگی در پیش‌بینی‌های مدل، از الگوریتم SHAP استفاده شده است.

نتایج و جمع‌بندی: بنابر نتایج این تحقیق، استفاده از استراتژی‌های کنترلی بهینه برای سایه‌بان‌ها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی مصرف انرژی را کاهش دهد. در تابستان، کاهش مصرف انرژی در شهرهای بندرعباس، یزد، ساری، و تبریز به ترتیب ۱۸/۸، ۳۵/۲، ۳۷/۸، و ۴۵/۵٪ بود و در زمستان نیز کاهش مصرف انرژی

۱. دانشجوی دوره دکتری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
fakhlaghi1377@gmail.com

۲. نویسنده مسئول
h.bagheri@hsu.ac.ir



۱۱۰ شماره ۳، پیاپی: ۱۴۰۴، فصلنامه علمی معماری و شهرسازی: سال سی و پنجم، پاییز ۱۴۰۴
*. Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

صفت
فصلنامه علمی معماری و شهرسازی: سال سی و پنجم، پاییز ۱۴۰۴، شماره ۳، پیاپی: ۱۱۰
*. Corresponding Author Email Address: h.bagheri@hsu.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.48308/SOFFEH.2025.233623.1300>

پرسش‌های پژوهش

۱. بهترین سناریوهای کنترلی سایه‌بان برای افزایش کارایی انرژی ساختمان کدامند؟
۲. تأثیر این سناریوها بر آسایش حرارتی و بصری ساکنین چگونه است؟
۳. نقش متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بر مصرف انرژی ساختمان چیست؟

مقدمه

به‌ترتیب ۴/۳، ۸/۰، ۷/۲ و ۵/۱٪ ثبت شد. همچنین، طراحی بهینه سایه‌بان‌ها باعث کاهش قابل‌توجه ناراضایتی حرارتی و بصری ساکنان می‌گردد؛ به‌طور نمونه، در تابستان زمان مطالعه، ناراضایتی حرارتی در تبریز تا ۶۴/۲٪ و ناراضایتی بصری در همه شهرها تا ۱۰۰٪ کاهش داشت. طبق این یافته‌ها، انتخاب استراتژی کنترلی مناسب و آستانه‌های فعال‌سازی مؤثر می‌تواند مصرف انرژی را کاهش دهد و آسایش حرارتی و بصری ساکنان را بهبود بخشد. در تابستان، سایه‌بان‌های خارجی با کنترل دمای بیرون در بندرعباس و سایه‌بان‌های خارجی با کنترل دمای داخل در یزد و تبریز بهترین گزینه‌ها از نظر کاهش مصرف انرژی و افزایش آسایش ساکنان شناخته شدند. در زمستان نیز بهترین سناریوها شامل کنترل‌کننده‌های مبتنی بر دمای بیرون با تنظیم‌کنندگی متناسب برای هر اقلیم بودند، نتایج این تحقیق نشان‌دهنده اهمیت انتخاب استراتژی کنترلی متناسب با شرایط اقلیمی و نیازهای خاص هر منطقه است که می‌تواند در طراحی پایداری و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی استفاده شود.

به پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی، مصرف انرژی در بخش ساختمان تا سال ۲۰۴۰، ۲۰٪ افزایش خواهد یافت.^۳ این افزایش لزوم اجرای طرح‌های مؤثر برای کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط محیطی در ساختمان‌ها را می‌رساند. از عوامل اصلی در بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان، طراحی پوسته ساختمان است، که نقش کلیدی در کنترل انتقال حرارت بین محیط‌های داخلی و خارجی دارد. با طراحی مناسب می‌توان از انرژی خورشیدی استفاده بهینه کرد؛ چراکه به کاهش تقاضای انرژی و بهبود آسایش حرارتی و بصری ساکنین کمک می‌کند.^۴

در طراحی ساختمان‌ها، تأمین آسایش حرارتی و بصری برای ساکنین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آسایش حرارتی با رضایت‌مندی از شرایط دما و رطوبت^۵ و آسایش بصری با شرایط رضایت‌بخش از نور و روشنایی^۶ روی می‌دهد. یک سیستم سایه‌بان خورشیدی کارآمد، با طراحی مناسب، می‌تواند نیازهای حرارتی داخلی را کاهش دهد، شرایط نور طبیعی را بهبود بخشد، و در نتیجه بهره‌وری انرژی را افزایش دهد و محیطی راحت‌تر را فراهم آورد.^۷ مجموعه‌ای از سیستم‌های سایه‌بان، از جمله سایه‌بان‌های خارجی، داخلی، و بین‌شیشه‌ای، با انواع ثابت یا متحرک، امکانات مختلفی را برای بهینه‌سازی شرایط بصری و حرارتی فراهم می‌کنند.^۸

با نصب و مدیریت درست سیستم‌های سایه‌بان خورشیدی، می‌توان نیازهای

3. N. Zhou et al., "A Roadmap for China to Peak Carbon Dioxide Emissions and Achieve a 20% Share of Non-Fossil Fuels in Primary Energy by 2030", *Applied Energy*, 239 (2019): 793-819.

4. F. Akhlaghinezhad, et al., "Deterministic and Probabilistic Occupant-centric Control's Impacts on the Indoor Environment in Free-running Households", *Smart and Sustainable Built Environment*, no. ahead-of-print (2024), <https://doi.org/10.1108/sasbe-10-2023-0316>.

5. ASHRAE Standing Standard Project Committee 55. *Cognizant TC: 2.1, Physiology, and Human Environment. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Ashrae, 2023.

6. Light, CEN. "Lighting—Basic Terms and Criteria for Specifying Lighting Requirements". *European Standard EN 12665*, 2011.

7. M.C. Pinto, et al., "Combining Energy Dynamic Simulation and Multi-criteria Analysis for Supporting Investment Decisions on Smart Shading Devices in Office Buildings". *Applied Energy*, 332 (2023): 120470.

8. A. Tabadkani, et al.,



- "A Review of Occupant-centric Control Strategies for Adaptive Facades", *Automation in Construction* 122 (2021): 103464.
9. W. Bustamante, et al., "An integrated thermal and lighting simulation tool to support the design process of complex fenestration systems for office buildings," *Applied energy* 198 (2017).
10. Dayan de Loyola Ramos Garcia and Fernando Oscar Ruttkay Pereira, "Method Application and Analyses of Visual and Thermal-Energy Performance Prediction in Offices Buildings with Internal Shading Devices", *Building and Environment*, 198 (2021): 107912.
11. DGP: Daylight Glare Probability
12. SHGC: Solar Heat Gain Coefficient
13. A.Tabadkani, et al., "Analysis of the Impact of Automatic Shading Control Scenarios on Occupant's Comfort and Energy Load", *Applied Energy*, 294 (2021): 116904.

داخل ساختمان، به کاهش نیازهای سرمایشی کمک می‌کنند.^{۱۶} در تحقیقات مختلف از آزمایش‌های میدانی، آزمایشگاهی، و شبیه‌سازی برای بررسی اثربخشی سایه‌بان‌های داخلی و خارجی استفاده شده که از هریک نتایج متفاوتی به‌دست آمده است.

نیوشام و همکاران^{۱۷} به بررسی اثر روش‌های کنترل سایه‌بان بر بار سرمایشی سالانه پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که فقدان مکانیزم‌های کنترلی مناسب موجب افزایش مصرف انرژی می‌شود. وایملنبرگ^{۱۸} نشان داد که حدود ۳۰٪ از تنظیمات زاویه پره‌های کرکره‌ها با تابش خورشید صورت می‌گیرد، اگرچه این تغییرات معمولاً جزئی هستند. همچنین، لیتلفیر^{۱۹} به این نتیجه رسید که هیچ ارتباطی بین دمای داخلی فضاها و تغییرات در وضعیت کرکره‌ها وجود ندارد.

اوه و همکاران^{۲۰} با هدف یافتن روشی برای تنظیم میزان بازتاب نور و کاهش ناراحتی بصری ناشی از خیرگی نور، راهکارهایی را برای بهینه‌سازی کرکره‌ها معرفی کردند. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که آن راهکارها منجر به کاهش معنادار مصرف انرژی و ناراحتی بصری شدند. همچنین، شن و همکاران^{۲۱}، با بررسی سناریوهای مختلف برای کرکره‌های داخلی و خارجی در سه اقلیم مختلف، نشان دادند که روش‌های کنترل یکپارچه کنترل نور و روشنایی می‌توانند بهبودهای قابل‌توجهی در عملکرد انرژی و آسایش بصری ایجاد کنند. شونگ و همکاران^{۲۲} نیز نماهای خودکار و سیستم‌های کنترل روشنایی و سایه‌بان را برای افزایش آسایش بصری و کاهش مصرف انرژی روشنایی به کار گرفتند. در «جدول ۱» خلاصه‌ای از نتایج مطالعات مختلف با رویکردها و پارامترهای متفاوت سایه‌بان‌ها ارائه شده است.

اگرچه تحقیقات پیشین عمدتاً بر کنترل‌های سایه‌بان متمرکز بوده‌اند، اما بهینه‌سازی انتخاب موقعیت، جهت‌گیری، و

گرمایش و سرمایش را کاهش داد. این سیستم‌ها با بهره‌برداری بیشتر از تابش خورشیدی در زمستان و کاهش تابش دریافتی در تابستان، منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شوند.^۹ استفاده از سایه‌بان‌های خورشیدی خودکار می‌تواند آسایش حرارتی و بصری ساکنین را بهبود بخشد؛ به‌طور مثال، گارسی و پیرا^{۱۱} روشی برای ارزیابی عملکرد ساختمان‌های اداری با سایه‌بان‌های قابل‌تنظیم عرضه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که سایه‌بان‌های غلظتی شفاف، نسبت به پرده‌های پارچه‌ای و کرکره‌ها، مؤثرتر هستند و یک وابستگی قوی بین روشنایی و تابش خورشیدی و همچنین بین احتمال خیرگی نور روز^{۱۱} و بهره‌وری گرمایی خورشیدی پنجره^{۱۲} وجود دارد. همچنین، بنابر تحقیقات تبادکانی و همکاران^{۱۳}، استفاده از سایه‌بان‌ها و سیستم‌های روشنایی خودکار در طراحی نماهای ساختمانی، به بهبود قابل‌توجهی در عملکرد انرژی، آسایش حرارتی، و بصری کاربران، به‌ویژه در شرایط آب‌وهوایی مختلف منجر می‌شود. آنها معتقدند که سایه‌بان خودکار می‌تواند به کاهش متوسط انسداد دید و مصرف انرژی روشنایی بیانجامد.

اسکارزینگ و همکاران^{۱۴} به بررسی تأثیر سایه‌بان‌های خودکار بر گرمای بیش از حد در ساختمان‌های مسکونی پرداخته‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند راحتی حرارتی را تا ۱۵٪ بهبود بخشد. همچنین در تحقیق دیگر نویسندگان مقاله پیش رو^{۱۵} بر نقش مهم شرایط آب‌وهوایی در کارایی سایه‌بان‌ها تأکید می‌شود، و بنابر این طراحی سیستم‌های سایه‌بان باید با توجه به شرایط خاص آب‌وهوایی مکان صورت گیرد تا آسایش حرارتی و بصری بهبود و مصرف انرژی کاهش یابد.

سایه‌بان‌های خارجی، به‌دلیل کارایی بالا در کاهش مصرف انرژی سرمایشی، مورد توجه گسترده محققان است. این سیستم‌ها با مسدود کردن تابش خورشیدی قبل از ورود آن به



خلاصه‌ای از تحقیقات با رویکردها و ویژگی‌ها و پارامترهای مختلف سایه‌بان، تدوین: نگارندگان.

تنظیمات سایه‌بان‌ها با توجه به شرایط اقلیمی مختلف در فصول سرد و گرم، برای کاهش مصرف انرژی و بهبود آسایش ساکنان، اهمیت بالایی دارد. مدل‌سازی آماری، به‌دلیل سادگی، قابلیت خودکارسازی، و کاهش هزینه‌ها، گزینه‌ای مؤثر برای ارزیابی عملکرد حرارتی و بصری ساختمان‌ها محسوب می‌شود.^{۲۳}

نتایج	پارامترهای در نظر گرفته‌شده			دوره زمانی	نوع ساختمان	موضوع	منبع
	آسایش حرارتی	مصرف انرژی	شاخص بصری				
کاهش بار الکتریکی روشنایی و انسداد کمتر دید به بیرون به‌دلیل کاهش استفاده از پرده	-	بار الکتریکی	روشنایی میز کار (Illuminance)	سالیانه	آموزشی / آمریکا	بررسی تأثیر سایه‌بان داخلی	Sanati and Utzinger, "The Effect of Window Shading Design ...", <i>Building and Environment</i> , 64 (2013): 67-76.
کاهش مصرف انرژی سالانه از طریق ترکیبی از سایه‌بان عمودی و افقی و مصالح چوبی تا ۱۳/۶۲٪	-	مصرف کل انرژی	-	سالیانه	مسکونی / آمریکا	بررسی اثر هم‌زمان پنجره، مصالح، و تنظیمات سایه‌بان	Haghighi, et al., "The Effect of Shading Design and Materials ...", International Construction Specialty Conference of the Canadian Society, 2015.
استفاده از سایه‌بان خودکار با الگوریتم‌های کنترلی پیشنهادی می‌تواند انرژی سایت را در محدوده ۱۱/۶ تا ۱۳/۰٪ کاهش دهد.	-	مصرف کل انرژی	-	سالیانه	مسکونی / آمریکا	ارزیابی الگوریتم‌های کنترلی مختلف برای سایه‌بان‌های خودکار پنجره‌ها	Firlag, et al., "Control Algorithms for Dynamic Windows ...", <i>Energy and Buildings</i> , 109 (2015): 157-173.
تأثیر بیشتر سایه‌بان‌های افقی نسبت به سایه‌بان‌های عمودی	-	-	تابش مستقیم خورشید	۱۲ روز مرجع	برزیل	بررسی هفت مدل سایه‌بان افقی و عمودی ساده در یک مطالعه تابستانی با ۸ جهت‌گیری	Santos, et al., "Method for Determining the Efficiency of Shading Devices", paper presented at the 50 th International Conference of the Architectural Science Association, 2016.
تأثیر بیشتر سایه‌بان افقی بر شرایط آسایش	-	بار سرمایشی بار گرمایشی بار الکتریکی	نرخ روشنایی روز (Daylight Factor DF) / روشنایی میز کار	سالیانه	آموزشی / ایران	ارزیابی انواع سایه‌بان‌ها شامل سایه‌بان افقی، قفسه نوری، سایه‌بان کرکره‌ای	Balador, et al., "Evaluation of Different Shading Devices ...", paper presented at the PLEA Conf, 2017.
سایه‌بان خودکار با استراتژی کنترلی دما و تابش‌محور (دمای بیرون بالای ۱۸ درجه و ۳۰۰ وات بر متر مربع تابش) تأثیر چندانی در مصرف انرژی و روشنایی ندارد و بهتر است از پوشش کنترل خورشیدی استفاده شود.	تطبیقی با دمای عامل	بار گرمایشی	خودمختاری نور روز (Daylight Autonomy) (DA)	سالیانه	مسکونی / رم و دانمارک	بررسی انتقادی سایه‌بان خودکار در مقایسه با جایگزین‌های دائمی	Skarning, et al., "The Effect of Dynamic Solar Shading on Energy, ...", <i>Energy and Buildings</i> , 135 (2017): 302-311.
کنترل پنجره پیش‌بینی‌کننده و سایه‌بان کرکره‌ای غلتکی ۵۵٪ انرژی سرمایشی را نسبت به خانه‌هایی با پنجره‌های بسته و سایه‌بان‌های غلتکی باز کاهش می‌دهد.	-	بار سرمایشی	-	۱ هفته	مسکونی / ژاپن	بررسی ۷ کنترل مختلف پنجره و سایه‌بان	Zhong, et al., "Comprehensive Evaluation of Energy and Indoor-PM2. ...", <i>Energy and Buildings</i> , 223 (2020): 110206.
کاهش چشمگیر بار سرمایشی	-	بار سرمایشی بار گرمایشی	خودمختاری نور روز / نرخ روشنایی روز / روشنایی میز کار	سالیانه	اداری / الجزایر	بررسی تأثیر سایه‌بان‌های خارجی ثابت	Magri Elouadjri, et al., "Evaluating the Effect of External Horizontal Fixed Shading Devices' Geometry ...", <i>Buildings</i> , vol. 11, no. 8 (2021): 348.



ادامه جدول ۱.
خلاصه‌ای از تحقیقات با رویکردها
و ویژگی‌ها و پارامترهای مختلف
سایه‌بان، تدوین: نگارندگان.

آسایش به کار رفته‌اند؛ به‌طور مثال، آریا و همکاران^{۲۷} از جنگل
تصادفی برای تشخیص ناهنجاری در مصرف انرژی ساختمان،
همچنین احمد و همکاران^{۲۸} از این الگوریتم برای پیش‌بینی
مصرف انرژی سیستم تهویه مطبوع ساعتی استفاده کرده‌اند.
الگوریتم‌های درختی، نظیر جنگل تصادفی و درخت
رگرسیون، معمولاً برای پیش‌بینی بار انرژی ساختمان به کار

یادگیری ماشین^{۲۴} یکی از روش‌های مدل‌سازی آماری است
که توانایی پیش‌بینی رفتار سیستم بدون نیاز به برنامه‌ریزی
صریح، همچنین سازگاری با شرایط متغیر محیطی را دارد. از
دهه ۱۹۹۰ تاکنون، کاربرد این روش در تحلیل انرژی ساختمان
رو به گسترش بوده است.^{۲۵} در سال‌های اخیر الگوریتم‌هایی
مانند جنگل تصادفی^{۲۶} برای پیش‌بینی مصرف انرژی و بهبود

نتایج	پارامترهای در نظر گرفته‌شده			دوره زمانی	نوع ساختمان	موضوع	منبع
	آسایش حرارتی	مصرف انرژی	شاخص بصری				
تأثیر بیشتر ترکیب سایه‌بان و تهویه نسبت به استفاده مجزا از هر کدام در آسایش حرارتی	دمای عامل رطوبت نسبی	-	-	۳۰ سال	غیرمسکونی / ایرلند و مجارستان	تعیین انعطاف‌پذیری سناریوهای مختلف کنترل سرمایش غیرفعال مانند تهویه روزانه، تهویه شبانه، و سایه‌بان خودکار؛ با تغییر نقاط تنظیم	O'Donovan, et al., "Passive Control Strategies for Cooling a Non-residential Nearly Zero Energy Office: ...", <i>Energy and Buildings</i> , 231 (2021).
سایه‌بان‌های خارجی خودکار بهترین عملکرد را دارند.	تطبیقی با دمای عامل	-	-	تابستان	مسکونی / اسپانیا	شناسایی بهترین راهبردهای تهویه طبیعی و سایه‌بان برای کاهش مسائل گرمایی بیش از حد در طول دوره گرما	Figueroa-Lopez, et al., "Evaluation of Passive Strategies, Natural Ventilation and Shading Systems, to ...", <i>Journal of Building Engineering</i> , 43 (2021): 102607.
تنظیم پارامترهای کلیدی پرده‌های وینز، صرفه‌جویی در انرژی سرمایشی می‌تواند به ۴۴٪ و صرفه‌جویی در انرژی گرمایشی تا ۶۵٪ برسد.	-	بار سرمایشی بار گرمایشی مصرف کل انرژی	احتمال خیرگی نور روز (Daylight Glare Probability DGP)	سالانه	مسکونی / آمریکا	شناسایی تأثیرگذارترین پارامترها (زاویه، موقعیت سایه‌بان نسبت به پنجره) برای بهینه‌سازی طراحی سایه‌بان و ارزیابی پتانسیل صرفه‌جویی انرژی توسط آنها	Tan, et al., "Parametric Study of Venetian Blinds for Energy Performance Evaluation ...", <i>Energy</i> , 239 (2022): 122266.
سایه‌بان ساده بتنی با عمق ۱ متر و قفسه نوری با مصالح چوبی بهترین عملکرد را دارند و تا ۷۲٪ مصرف انرژی را کاهش می‌دهند.	-	بار سرمایشی بار گرمایشی مصرف کل انرژی	خودمختاری نور روز / روشنایی مفید نورروز (Useful Daylight Illuminance UDI) / احتمال خیرگی نور روز	سالانه	آموزشی / ایران	انتخاب سایه‌بان بهینه در چرخه حیات یک ساختمان آموزشی بر اساس ارزیابی سه عامل مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، و هزینه	Dokhanian, et al., "Shading Design Optimization in a Semi-arid Region: ...", <i>Journal of Cleaner Production</i> , 428 (2023): 139293.
روش بهینه‌سازی پیشنهادی منجر به کاهش ۲/۸-۴۷/۸ درصدی در کل انرژی مصرفی ساختمان، ۱۵/۵-۶۹/۹٪ و ۸/۵-۵۶/۳٪ کاهش به‌ترتیب در شاخص‌های DGI و PPD در مقایسه با طراحی اولیه به طور هم‌زمان می‌شود.	درصد پیش‌بینی‌شده نارضایتی حرارتی (Predicted Percentage of Dissatisfied PPD)	مصرف کل انرژی	شاخص خیرگی نور روز (Daylight Glare Index) (DGI)	سالانه	اداری / ایران	اجرای سناریوهای کنترلی سایه‌بان و بهینه‌سازی هم‌زمان جهت‌گیری، ابعاد، زاویه، مصالح، و ...	Naderi, et al., "Multi-Objective Simulation-Based Optimization of Controlled ...", <i>Building and Environment</i> , 169 (2020): 106570.

14. G.C.J. Skarning, et al., "The Effect of Dynamic Solar Shading on Energy, Daylighting and Thermal Comfort in a Nearly Zero-Energy Loft Room in Rome and Copenhagen", *Energy and Buildings*, 135 (2017): 302-311.

15. F. Akhlaghinezhad and H Bagheri Sabzevar, "The Effect of Probabilistic Window Opening Behavior of Occupants on Adaptive Thermal Comfort (the Case of Courtyard House in Yazd, Bandar Abbas, and Tabriz)", *Iranica Journal of Energy & Environment*, vol. 14, no. 3 (2023): 252-262.

16. Dongsu Kim, et al., "Comparative Investigation on Building Energy Performance of Double Skin Façade (Dsf) with Interior or Exterior Slat Blinds", *Journal of Building Engineering*, 20 (2018): 411-423.

ت ۱. هندسه مدل مورد نظر در حالت پایه، مأخذ: Ashrae، طرح و ترسیم: نگارندگان.

می‌روند. این روش‌ها، با تجمع نتایج پیش‌بینی، دقت بیشتری دارند و می‌توانند تطبیق بیش از حد مدل را کاهش دهند.

مرحله اول این تحقیق، بهینه‌سازی سناریوهای کنترلی مهم برای کاهش مصرف انرژی و بهبود آسایش حرارتی و بصری را در بر می‌گیرد. این سناریوها شامل موقعیت سایه‌بان‌ها، جهت‌گیری ساختمان، و ویژگی‌های کنترلی مربوطه هستند. بهینه‌سازی بر اساس شاخص‌های بار سرمایشی و گرمایشی، بار الکتریکی روشنایی، کل مصرف انرژی ساختمان، و نارضایتی حرارتی و بصری ساکنان در دو دوره گرم و سرد سال انجام می‌شود. از این شاخص‌ها، با عنوان «توابع هدف»، برای دستیابی به بهترین بهره‌برداری از ساختمان استفاده شده است. برای مدل‌سازی انرژی از نرم‌افزار انرژی پلاس، برای طراحی پارامتریک از جی‌پلاس، و برای بهینه‌سازی از روش brute-force با بیش از ۴۵۶۰۰ تکرار شبیه‌سازی استفاده شده است. در مرحله دوم، پیش‌بینی کل مصرف انرژی ساختمان با استفاده از داده‌های آموزشی و مدل جنگل تصادفی انجام می‌شود. تفسیر پیش‌بینی‌ها با استفاده از

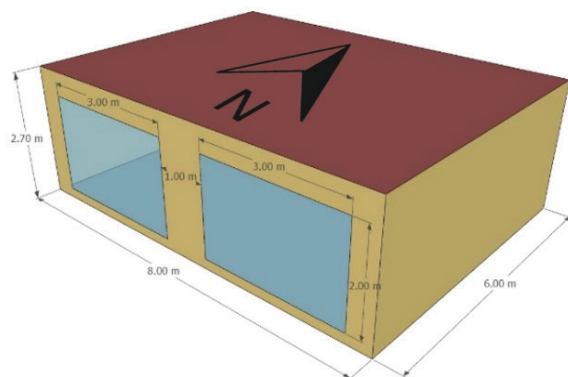
الگوریتم SHAP^{۲۹} صورت می‌گیرد تا تأثیر متغیرهای مختلف مؤثر بر پیش‌بینی بر مصرف کل انرژی مشخص شود. SHAP به‌منزله ابزاری برای تفسیر مدل‌ها و درک نقش ویژگی‌ها در پیش‌بینی‌های مدل عمل می‌کند و به درک عمیق‌تر از فرایندهای تصمیم‌گیری مدل‌های یادگیری ماشین کمک می‌کند.^{۳۰} این رویکرد به شفاف‌سازی نحوه اثرگذاری متغیرهای مختلف بر مصرف انرژی و کمک به انتخاب سناریوهای بهینه‌تر می‌پردازد.

۱. روش تحقیق

در این تحقیق، از نمونه ۶۰۰ استاندارد ۱۴۰ اشری^{۳۱} استفاده می‌شود.^{۳۲} بر مبنای استاندارد ۱۴۰، تقاضای انرژی

شبیه‌سازی‌شده یک زون حرارتی با استفاده از ابزارهای مختلف شبیه‌سازی انرژی ساختمان مستند می‌شود. در مطالعه پیش رو نیز از نمونه ۶۰۰ برای انجام شبیه‌سازی‌ها با کاربری مسکونی استفاده می‌شود که شامل یک زون مکعبی با ابعاد $۸ \times ۶ \times ۲$ متر و دو پنجره (هرکدام ۳×۲ متر) در دیوار جنوبی است (جهت‌گیری مبنا = ۰) (ت ۱).

در این مقاله، پارامترهای مرتبط با سایه‌بان در یک واحد مسکونی بهینه‌سازی شده‌اند. با توجه به شکاف پژوهشی موجود در کاربری مسکونی، به‌دلیل مسئله حریمیت، انتخاب این کاربری منطقی به نظر می‌رسد. مقادیر ضریب انتقال حرارت^{۳۳} برای عناصر پوسته ساختمان بر اساس «جدول ۲» تعیین شده‌اند. فرض بر این است که مدل یک ساختمان مسکونی ویلایی شبیه‌سازی می‌شود و همه جداره‌ها در معرض هوای آزاد هستند. برنامه زمان‌بندی حضور ساکنان، روشنایی و دمای تنظیم‌شده برای گرمایش (۲۰ درجه سانتی‌گراد) و سرمایش (۲۸ درجه برای شهرهای یزد، ساری، و تبریز و ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای بندرعباس) در نظر گرفته شده است.^{۳۴} همچنین فرض شده که بازای هر $۴۲/۵$ متر مربع فضا، یک نفر با سطح فعالیت ۱۲۰ وات بر نفر حضور دارد و سطح لباس این افراد در بازه ۱-۰/۴۵ clo، بر اساس مدل پویای لباس



17. GR Newsham, "Manual Control of Window Blinds and Electric Lighting: Implications for Comfort and Energy Consumption", *Indoor Environment*, vol. 3, no. 3 (1994): 135-144.
18. Kevin Van Den Wymelenberg, "Patterns of Occupant Interaction with Window Blinds: A Literature Review", *Energy and Buildings*, 51 (2012): 165-176.
19. PJ Littlefair, *Control of Solar Shading* (BRE, 2002).
20. M.H. Oh, et al., "Automated Control Strategies of inside Slat-Type Blind Considering Visual Comfort and Building Energy Performance", *Energy and Buildings*, 55 (2012): 728-737.
21. Eric Shen, et al., "Comparison of Energy and Visual Comfort Performance of Independent and Integrated Lighting and Daylight Controls Strategies", Paper presented at the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry, 2013.

جدول ۲. جزئیات فرضیات ثابت در شبیه‌سازی، تدوین: نگارندگان.

پارامتر	مقادیر
کاربری	مسکونی
شرایط مرزی جداره‌ها	در معرض هوای آزاد
مشخصات سقف / کف / دیوارها	موقعیت
	ضریب انتقال حرارت (U-W/m²K)
	دیوار
	سقف
	کف
	بندرعباس ۲/۳
مشخصات پنجره‌ها	یزد ۱/۵
	ساری ۱/۲
	تبریز ۲/۳
	موقعیت
	ضریب انتقال حرارت (U-W/m²K)
	ضریب بهره گرمایی خورشیدی (SHGC)
بارهای داخلی	بندرعباس ۳/۱
	یزد ۳/۱
	ساری ۳/۱
	تبریز ۳/۱
	مساحت/تعداد افراد: ۴۲/۵ متر مربع / نفر
	نرخ تأمین هوای تازه: ۱ متر مکعب در ساعت
	بار روشنایی: ۲۰۰ وات
مشخصات افراد	روشنایی
	افراد
	سطح فعالیت: ۱۲۰۰ وات بر نفر
	سطح لباس: ۰/۴۵-۱ clo
	اعمال نشده است.
	سیستم مکانیکی ایدئال
تهویه طبیعی	نقطه تنظیم گرمایشی
تهویه مطبوع	نقطه تنظیم سرمایشی
نقطه تنظیم گرمایشی	نقطه تنظیم روشنایی
نقطه تنظیم سرمایشی	نقطه تنظیم خیرگی (DGI)
نقطه تنظیم روشنایی	توزیع خورشیدی
نقطه تنظیم خیرگی (DGI)	ارتفاع زون
توزیع خورشیدی	ابعاد زون

22. J. Xiong and A. Tzempelikos, "Model-Based Shading and Lighting Controls Considering Visual Comfort and Energy Use", *Solar Energy*, 134 (2016): 416-428.

جدول ۳. مشخصات سناریوهای کنترلی سایه‌بان، تدوین: نگارندگان.

گرفته می‌شود. مشخصات سایه‌بان‌ها مطابق با استانداردهای ASHRAE 2020 انرژی پلاس شامل پره‌هایی با عرض و فاصله ۲۵ میلیمتری و انعکاس متوسط ۰/۵ است. این پارامترها به‌منظور عرضه مدلی قابل اجرا و مطابق با استانداردهای روز صنعت ساختمان تعریف شده‌اند.

با افزایش پیچیدگی طراحی ساختمان‌های مدرن و پیشرفت‌های مهم نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی، استفاده از این ابزارها به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در نرم‌افزار انرژی پلاس که از سوی DOE آمریکا در سال ۲۰۰۱ توسعه یافته، از مفهوم تعادل حرارتی برای محاسبه رفتار حرارتی ساختمان‌ها استفاده می‌شود.^{۳۸} با وجود قابلیت‌های گسترده‌ی انرژی پلاس، برای بهینه‌سازی نیاز به نرم‌افزار ثانویه مانند

محاسبه می‌شود.^{۳۵} نرخ هوای تازه واردشده به اتاق طبق مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، برای هر ساعت ۱ متر مکعب در نظر گرفته شده است. روشنایی مصنوعی در زون مورد بررسی فقط زمانی فعال می‌شود که سطح روشنایی طبیعی در ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری از سطح میز کار کمتر از ۵۰۰ لوکس باشد. در این تحقیق، بار الکتریکی فقط به بار ناشی از روشنایی محدود می‌شود و برای سادگی محاسبات، از سیستم گرمایش و سرمایش مکانیکی ایدئال^{۳۶} با بازدهی ۱۰۰٪ استفاده شده است (جدول ۲).

در این مطالعه به تحلیل کرکره‌ها، یکی از رایج‌ترین سایه‌بان‌ها، پرداخته می‌شود.^{۳۷} برای سادگی محاسبات، زاویه پره‌ها فقط در دو حالت بسته (۰ درجه) یا باز (۹۰ درجه) در نظر

گام تغییر	محدوده تغییر نقطه تنظیم	واحد نقطه تنظیم	کنترل‌های دوره گرم سال (تابستانی)	گام تغییر	محدوده تغییر نقطه تنظیم	واحد نقطه تنظیم	کنترل‌های دوره سرد سال (زمستانی)	گام تغییر	محدوده تغییر نقطه تنظیم	واحد نقطه تنظیم
			Always Off	مبنا			Always Off	مبنا		
			* Always On	S1			* Always On	S1		
-	۲۲	-	* On If High Glare	S2			* On If High Glare	S2		
	۳۰-۱۵		On If High Outdoor Air Temperature	S3			On Night If Low Out door Temp And Off Day	S3		
۰/۵	۲۸-۲۰ **	C °	On If High Zone Air Temperature	S4			On Night If Low Inside Temp And Off Day	S4		
	۳۰-۱۵		* On Night If Low Outdoor Temp And On Day If Cooling	S5			* On Night If Low Out door Temp And On Day If Cooling ow Outdoor Temp And On Day If Cooling	S5		
۱۰۰	۲۵۰۰-۱۰۰	W	On If High Zone Cooling	S6			On Night If Heating And Off Day	S6		
			* On Night If Heating And On Day If Cooling	S7			* On Night If Heating And On Day If Cooling	S7		
۴۰	۴۵۰۰۰	W/m²	On If High Solar On Window	S8						
			On If High Horizontal Solar	S9						
			Off Night And On Day If Cooling And High Solar On Window	S10						
			On Night And On Day If Cooling And High Solar On Window	S11						
۴۰	۴۵۰۰۰	W/m²	On If High Outdoor Air Temp And High Solar On Window	S12						
۰/۵	۳۰-۱۵	C °	On If High Out door Air Temp And High Horizontal Solar	S13						
۴۰	۴۵۰۰۰	W/m²	On If High Zone Air Temp And High Solar On Window	S14						
۰/۵	۲۸-۲۰ **	C °	On If High Zone Air Temp And High Horizont al Solar	S15						

*. کنترل‌های عمومی که در هر دو بازه زمانی تابستان و زمستان استفاده می‌شود (USDOE 2019).

**. به جز در اقلیم بندرعباس که به جای ۲۵/۲۸ در نظر گرفته شده است.

23. Liang Zhang, et al., "A Review of Machine Learning in Building Load Prediction". *Applied Energy*, 285 (2021): 116452.

جدول ۴ (پایین). مشخصات آب‌وهوایی اقلیم‌های مورد مطالعه، تدوین: نگارندگان.

ت ۲ (بالا). تعریف دوره‌های گرم و سرد سال، مأخذ:

Firlag, et al., "Control Algorithms for Dynamic Windows for Residential Buildings".

ایران، انتخاب شده است. مطابق با مطالعه فیرلگ و همکاران^{۴۵}، دوره‌های گرم (تابستانی) و سرد (زمستانی) در شهرهای یزد، ساری، و تبریز بر اساس میانگین هفتگی دمای داخلی زون و میانگین نقاط تنظیم ترموستات (۲۰ و ۲۸ درجه سانتی‌گراد) تعیین می‌شود. به این صورت که اگر میانگین هفتگی دمای داخلی بیش از ۲۴ درجه باشد، زون در دوره گرم سال قرار دارد و از سناریوهای تابستانی استفاده می‌شود. در غیر این صورت، زون در دوره سرد سال قرار می‌گیرد و سناریوهای زمستانی به کار می‌آیند. برای شهر بندرعباس، با در نظر گرفتن تفاوت در نقاط تنظیم ترموستات (۲۰ و ۲۵ درجه)، دمای ۲۲/۵ درجه به منزله معیار دوره‌های گرمایی و سرمایی در نظر گرفته شده است (ت ۲).

بنابراین، تعداد روزهای گرم و سرد سال در هر اقلیم متفاوت است که این اختلاف‌ها در «جدول ۳» آمده است. شبیه‌سازی کنترل‌های تابستانی و زمستانی سایه‌بان‌ها نیز بر اساس مدت دوره شبیه‌سازی در هر شهر متفاوت خواهد بود. فایل‌های

جی‌پلاس است که ژانگ و کرولیجا^{۴۹} در سال ۲۰۰۹ آن را ابداع کردند. این نرم‌افزار به کاربران امکان می‌دهد تا مطالعات پارامتریک را با استفاده از انرژی پلاس انجام دهند. در تحقیق پیش رو به بهینه‌سازی موقعیت سایه‌بان‌ها (داخلی/خارجی)، جهت‌گیری ساختمان (۰ = پنجره رو به جنوب، ۹۰ = پنجره رو به غرب، ۱۸۰ = پنجره رو به شمال و ۲۷۰ = پنجره رو به شرق)، و سناریوهای کنترلی سایه‌بان‌ها «جدول ۳» پرداخته می‌شود. هدف اصلی در این تحقیق، انتخاب استراتژی کنترلی مناسب برای سایه‌بان‌ها در دو دوره گرم و سرد سال در چهار اقلیم مختلف ایران است. این بررسی شامل تحلیل اثرات مختلف ۱۹ استراتژی کنترلی بر بار سرمایشی، گرمایشی، بار الکتریکی روشنایی، کل مصرف انرژی ساختمان، و همچنین آسایش حرارتی و بصری ساکنان بر اساس شاخص‌های PPD^{۴۰} و DGI^{۴۰} است. مدل مبنا در این تحقیق، بدون سایه‌بان است (Always Off) و نتایج با آن مقایسه می‌شوند. در ادامه تحقیق، از مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی برای پیش‌بینی و بررسی تأثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده با الگوریتم SHAP استفاده خواهد شد. حسگر شاخص خیرگی (DGI) در مرکز زون و در ارتفاع ۰/۸ متری از کف (ارتفاع میزکار) قرار گرفته و مقدار آن طبق فرمول تعریف‌شده در انرژی پلاس محاسبه می‌شود.^{۴۲} بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کپن^{۴۳}، ایران دارای چهار منطقه اقلیمی اصلی است^{۴۴} که در «جدول ۴» بررسی شده‌اند. برای هریک از این اقلیم‌ها، یک شهر بزرگ، مرکز یکی از استان‌های



شهر	منطقه اقلیمی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	میانگین دمای سالانه [C]	میانگین رطوبت نسبی [%]	حداقل میانگین دمای روزانه [C]	حداکثر میانگین دمای روزانه [C]	تعداد روزهای سرد سال	تعداد روزهای گرم و سرد (اعتدالین)	تعداد روزهای گرم سال
بندر عباس	گرم و مرطوب	۵۶/۲	۲۷/۱	۹	۲۶/۸	۶۵/۲	۱۲/۰	۳۶/۹	۵۰	۳۵	۲۸۰
یزد	گرم و خشک	۵۴/۳	۳۱/۹	۱۲۳۷	۱۹/۲	۲۹/۲	۱/۰	۳۵/۳	۱۷۶	۴۲	۱۴۷
ساری	معتدل و مرطوب	۵۳/۲	۳۶/۶	۱۰	۱۷/۳	۷۸/۹	۴/۶	۳۰/۱	۱۹۷	۴۲	۱۲۶
تبریز	سرد	۴۶/۲	۳۸/۰	۱۳۶۱	۱۲/۰	۵۳/۵	-۱۰/۶	۳۰/۷	۲۱۸	۴۲	۱۰۵

اقلیمی شهرهای بندرعباس، یزد، و تبریز از پایگاه داده انرژی پلاس و شهر ساری از پایگاه داده OneBuilding جمع‌آوری شده‌اند که هریک حاوی عوامل محیطی ساعتی است. داده‌ها به‌صورت فایل‌های epw وارد ابزارهای شبیه‌سازی ساختمان می‌شوند.

۲. نتایج

تابش خورشیدی واردشده به داخل اتاق تأثیر قابل‌توجهی بر میزان مصرف انرژی حرارتی ساختمان در فصول تابستان و زمستان دارد. سایه‌بان، ابزار کنترل‌کننده تابش خورشیدی، نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی دارد. در نرم‌افزار انرژی پلاس سناریوهای مختلف کنترل سایه‌بان در سه دسته تابستانی، زمستانی، و سالیانه تقسیم‌بندی شده‌اند تا به‌ترتیب، بار سرمایشی و بار گرمایشی و هردو آنها را کاهش دهند. در این مقاله، سناریوهای سالیانه هم در دسته کنترل‌های تابستانی و هم زمستانی بررسی شده‌اند تا امکان مقایسه با سایر سناریوها فراهم باشد. بنابراین، سناریوها به دو گروه کنترل‌های تابستانی و زمستانی قابل‌تقسیم هستند. مقایسه در هردو گروه بر اساس سناریوی بدون سایه‌بان (AlwaysOff) انجام شده و نتایج به‌صورت درصد تغییر در متغیرهای هدف، نسبت به حالت مبنا، در نمودارها به‌صورت افزایش (+) یا کاهش (-) نمایش داده شده است.

۲.۱. مقایسه سناریوهای کنترلی تابستانی

در این بخش سناریوهای تابستانی و سالیانه بررسی می‌شود، این سناریوها فقط در دوره‌های گرم سال و بر اساس شرایط آب‌وهوایی هر شهر اجرا می‌شوند. ارزیابی‌ها ابتدا بر اساس بار سرمایشی و بار الکتریکی روشنایی، و سپس بر اساس مصرف کل انرژی ساختمان صورت می‌گیرد و نتایج آنها در

24. Machine Learning
25. A. Bassi, et al., "Building Energy Consumption Forecasting: A Comparison of Gradient Boosting Models", Paper presented at the Proceedings of the 12th International Conference on Advances in Information Technology, 2021.
26. Random Forest
27. D.B. Araya, et al., "An Ensemble Learning Framework for Anomaly Detection in Building Energy Consumption", *Energy and Buildings*, 144 (2017): 191-206.
28. Muhammad Waseem Ahmad, et al., "Trees vs Neurons: Comparison between Random Forest and Ann for High-Resolution Prediction of Building Energy Consumption", *Energy and Buildings*, 147 (2017): 77-89.
29. SHapley Additive exPlanations
30. E. Winter, "The Shapley Value", *Handbook of Game Theory with Economic Applications*, 3 (2002): 2025-2054.
31. Ashrae

قالب نمودارهای باکس چارت ارائه می‌شوند؛ در این نمودارها تغییرات بارها موقعیت سایه‌بان‌ها مورد نظر هستند. سناریوهایی که بیشترین کاهش در مصرف انرژی را دارند، بر اساس تعداد ساعات ناراضایتی حرارتی و بصری ارزیابی می‌شوند. در این دوره، به‌دلیل ناچیز بودن مصرف انرژی گرمایشی، این مصرف بررسی نمی‌شود. این مجموعه سناریو ۱۵ عضو دارد که در «ت ۳» تا «ت ۵»، تغییرات درصدی در بار سرمایشی، بار الکتریکی روشنایی، و مصرف کل انرژی، در مقایسه با حالت بدون سایه‌بان (سناریوی مبنا) نشان داده شده است.

۲.۱.۱. بار سرمایشی

استفاده از کنترل‌های تابستانی سایه‌بان در کاهش بار سرمایشی ساختمان‌ها در همه شهرها مؤثر است (ت ۳)، اما میزان کاهش بستگی به نوع کنترل، جهت‌گیری پنجره‌ها، موقعیت سایه‌بان، و نوع اقلیم دارد. این کارایی به‌ترتیب در بندرعباس (۱۰/۹٪)، یزد (۲۷/۴٪)، ساری (۳۱/۴٪)، و تبریز (۵۵/۶٪) افزایش می‌یابد، که نشان می‌دهد در اقلیم‌های سردتر، کارایی سایه‌بان در کاهش بار سرمایشی بیشتر است. این امر به این دلیل است که در اقلیم‌های سرد، افزایش بار حرارتی ساختمان تنها ناشی از تابش خورشیدی است که می‌توان آن را با کنترل سایه‌بان کاهش داد.

همچنین، نصب سایه‌بان‌ها در جهت‌های شرقی و غربی تأثیر بیشتری نسبت به جهت‌های شمالی و جنوبی دارد. در شهرهای بندرعباس، یزد، تبریز، و ساری به‌ترتیب ۳۳/۵، ۳۹/۵، ۲۷/۱، و ۰/۶٪ افزایش تأثیر مشاهده شده است. این تفاوت به‌دلیل تابش بیشتر خورشیدی روی سطوح شرقی و غربی در تابستان نسبت به سطوح شمالی و جنوبی است. در همه اقلیم‌ها، بیشترین اثر سایه‌بان زمانی است که پنجره‌ها رو به غرب باشد، و کمترین اثر آن در ساختمان‌هایی با پنجره‌های رو



ت ۳ (بالا). تأثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بر بار سرمایشی ساختمان در کنترل‌های تابستانی، تدوین: نگارندگان.

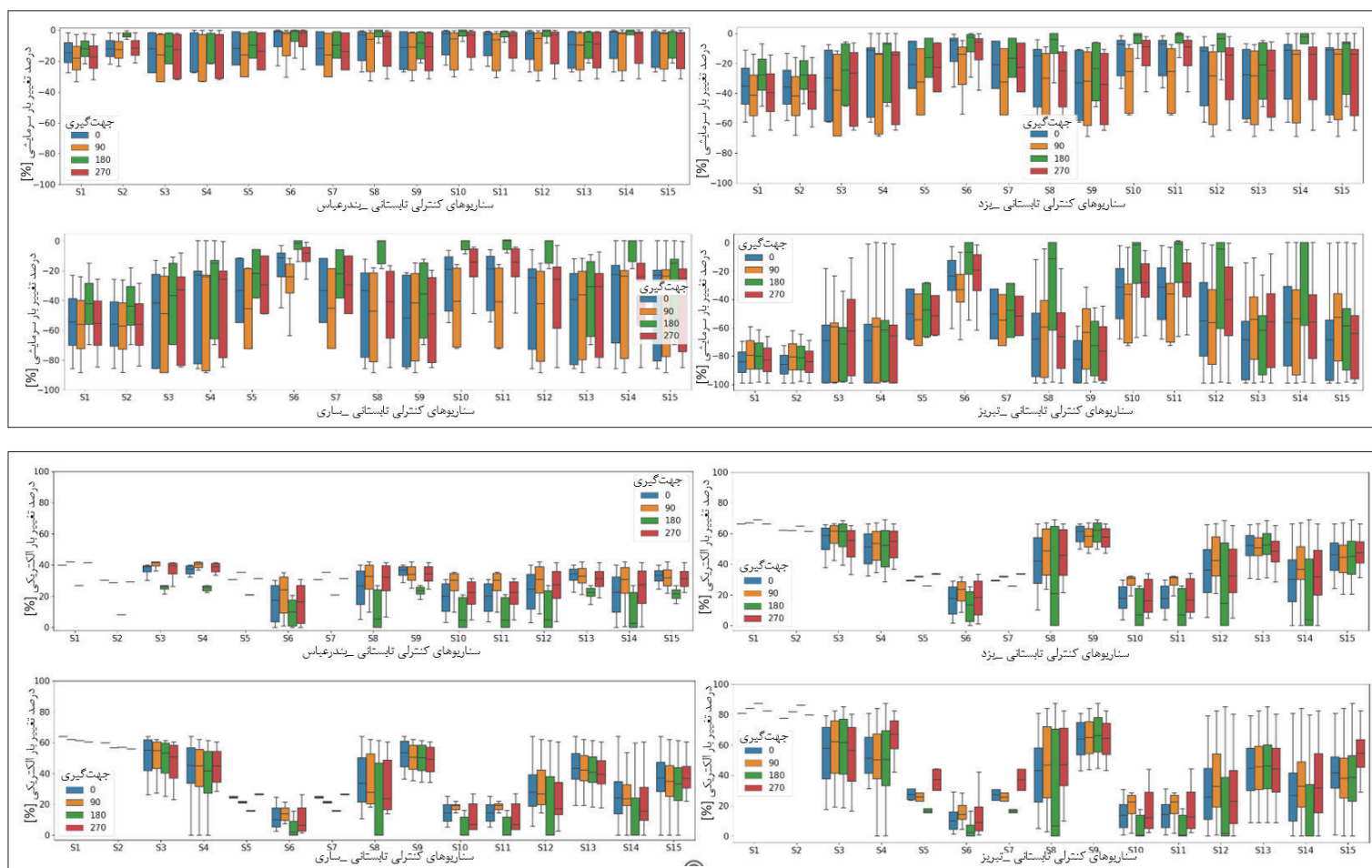
ت ۴ (پایین). تأثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بر بار الکتریکی روشنایی ساختمان در کنترل‌های تابستانی، تدوین: نگارندگان.

به اقلیم منطقه بستگی دارد (ت ۴). در بندرعباس، ساری، تبریز، و یزد این افزایش به‌ترتیب $۰/۲۵/۹\%$ ، $۰/۳۱/۴\%$ ، $۰/۳۵/۹\%$ ، و $۰/۴۰/۳\%$ است. این نتایج نشان می‌دهند که بستن سایه‌بان‌ها برای خنک کردن محیط در تابستان به کاهش نور طبیعی و افزایش نیاز به روشنایی مصنوعی منجر می‌شود. بنابراین، انتخاب سناریوهای کنترلی باید به‌گونه‌ای باشد که تعادلی میان بار سرمایشی و بار الکتریکی روشنایی ایجاد کند.

به شمال است. در بندرعباس این مقدار بین $۷/۳$ تا $۱۳/۶\%$ ، در یزد بین $۱۷/۹$ تا $۳۴/۷\%$ ، در ساری بین $۲۴/۹$ تا $۴۸/۱\%$ ، و در تبریز بین $۳۹/۴$ تا $۶۱/۵\%$ (به‌طور استثنای در جبهه جنوبی) است.

۲.۱.۲. بار الکتریکی روشنایی

استفاده از کنترل‌های تابستانی سایه‌بان در همه شهرها منجر به افزایش بار الکتریکی روشنایی می‌شود که میزان این افزایش



32. J. Neymark, et al., *Update of Ashrae Standard 140 Section 5.2 and Related Sections (Bestest Building Thermal Fabric Test Cases)*. Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), 2020.

33. U-Value

34. National Building Regulations of Iran. Chapter 19: Energy Conservation. Tehran, Iran: Iranian National Building Regulations, 2020.

ت ۵. تأثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بر مصرف کل انرژی ساختمان در کنترل‌های تابستانی، تدوین: نگارندگان.

سناریوهای ۶، ۱۰ و ۱۱ در همه شهرها کمترین افزایش در بار الکتریکی روشنایی را داشته‌اند. در سناریو ۶، این افزایش در بندرعباس، یزد، ساری، و تبریز به ترتیب ۱۵/۳، ۱۷/۱، ۱۰/۰ و ۱۰/۸٪ است. همچنین برای این سناریوها کمترین کاهش بار سرمایشی به ترتیب ۵/۶، ۱۳/۲، ۱۶/۵ و ۲۳/۲٪ ثبت شده است. چراکه در این سناریوها، سایه‌بان‌ها تا رسیدن به حد نقاط تنظیم سرمایش باز می‌مانند و تأثیری بر محدودیت نور ندارند، که این باعث کاهش کمتری در مصرف انرژی سرمایش می‌شود.

۳.۱.۲. مصرف کل انرژی در تابستان

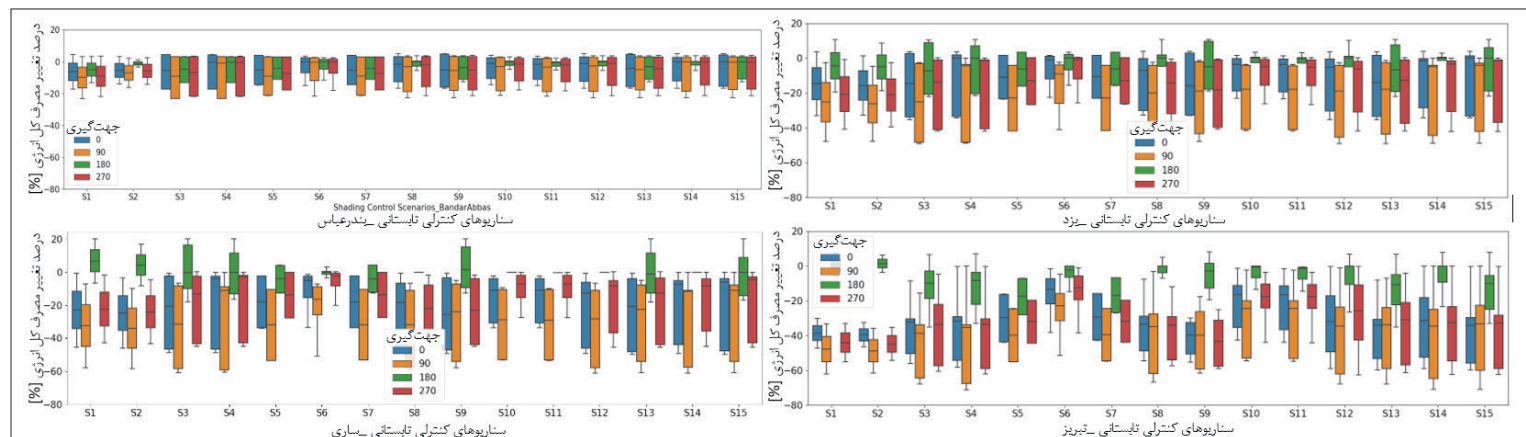
در «ت ۵» مصرف کل انرژی در تابستان، شامل انرژی‌های سرمایشی و روشنایی، مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه سایه‌بان‌ها در تابستان می‌توانند بار سرمایشی را کاهش دهند و احتمالاً بار الکتریکی روشنایی را افزایش دهند، مصرف کل انرژی در سناریوها و شرایط مختلف متغیر است. همچنین، در این تصویر کارایی سایه‌بان‌ها در کاهش مصرف کل انرژی را نشان می‌دهد که به اقلیم وابسته است. در شهرهایی مانند تبریز و ساری با تابستان‌های معتدل‌تر، تأثیر سایه‌بان‌ها بیشتر است، در حالی که در شهرهای گرم‌تری مانند یزد و بندرعباس

تأثیر آنها کمتر است. این به دلیل تأثیر بیشتر تابش خورشیدی در دماهای پایین‌تر است. همچنین، کاهش درصدی مصرف انرژی با استفاده از سایه‌بان‌ها در جبهه‌های شرقی و غربی بیشتر از جبهه‌های شمالی و جنوبی است، که اهمیت نصب سایه‌بان‌ها روی این سطوح را نشان می‌دهد.

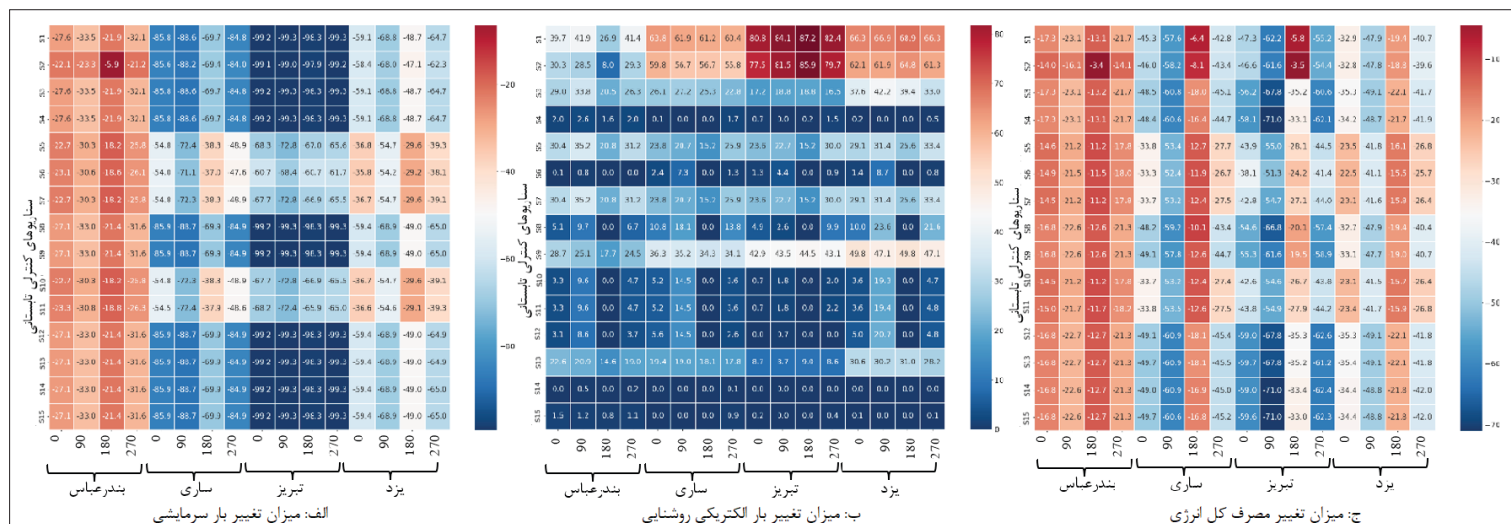
سناریوهای ۶، ۱۰ و ۱۱ در کاهش مصرف کل انرژی کمترین تأثیر را داشته‌اند؛ زیرا سایه‌بان‌ها در این سناریوها تا رسیدن به حداکثر دما باز نگه داشته می‌شوند، که تأثیر آنها را در کاهش مصرف انرژی محدود می‌کند. کاهش مصرف انرژی در بندرعباس، یزد، تبریز، و ساری به ترتیب ۳/۳، ۷/۶، ۹/۴ و ۱۴/۵٪ است. بیشترین کاهش مصرف انرژی در این شهرها مربوط به سناریوهای ۳، ۲، ۸ و ۴ است، با کاهش‌های به ترتیب ۷/۵، ۱۷/۰، ۱۹/۸ و ۳۵/۱٪. اثربخشی هر سناریو و بهینه‌ترین حالت آن در بخش بعدی بررسی خواهد شد.

۴.۱.۲. انتخاب بهینه‌ترین سناریو از منظر بار سرمایشی، بار الکتریکی روشنایی، و مصرف کل انرژی در تابستان

در انتخاب سناریوهای کنترلی تابستانی، آستانه فعال‌سازی بر اساس محرک‌های کنترلی نظیر دما، تابش، و بار حرارتی



ت ع تأثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بر بار سرمایشی، بار الکتریکی روشنایی، و مصرف کل انرژی ساختمان در بهینه‌ترین حالت کنترل‌های تابستانی (محور افقی): جهت‌گیری‌های مختلف در شهرهای مورد بررسی، محور عمودی: سناریوهای کنترلی تابستانی، رنگ‌های سرد، بیشترین کاهش بار سرمایشی، کمترین افزایش بار الکتریکی روشنایی، و بیشترین کاهش مصرف کل انرژی را نسبت به حالت مبنا نشان می‌دهد. اعداد داخل هر خانه بیانگر مقدار کاهش است، تدوین: نگارندگان.



یک متغیر کلیدی است. این انتخاب به تعیین سناریوهای که بیشترین آسایش بصری و حرارتی را بروز می‌دهند، کمک می‌کند. در «ت ع الف» مشاهده می‌شود که سناریوهای ۸، ۹، ۱۲، ۱۳، ۱۴، و ۱۵ در کاهش بار سرمایشی در همه شهرها عملکرد بهتری دارند. سناریوهای ۱، ۲، ۳، و ۴ در بیشتر شهرها عملکرد متوسطی داشته‌اند، درحالی‌که سناریوهای ۵، ۶، ۷، ۱۰، و ۱۱ از نظر حرارتی عملکردشان ضعیف بوده است. سناریوهای مبتنی بر تابش خورشیدی (مانند سناریوهای ۸ و ۹) و ترکیب محرک‌های دمایی با تابش (مانند سناریوهای ۱۲ تا ۱۵) در مقایسه با سناریوهای که فقط به دما وابسته هستند (مانند سناریوهای ۳ و ۴)، عملکرد بهتری دارند. بنابراین، سناریوهای ۸ و ۹ می‌توانند گزینه‌های اولیه برای کاهش بار سرمایشی در نظر گرفته شوند.

در بهترین حالت هر سناریوی کنترلی، بر اساس بار الکتریکی روشنایی که در «ت ع ب» نشان داده شده است، سناریوهای ۴، ۱۴، و ۱۵ کمترین افزایش بار الکتریکی روشنایی را در همه شهرها داشته‌اند. این نتایج با توجه به حساسیت سناریوها نسبت

به دمای داخلی و محدوده دمایی سیستم مکانیکی قابل توجه است.

در «ت ع ج» کارایی سناریوهای کنترلی را از نظر کاهش مصرف کل انرژی می‌توان دید. سناریوها به سه دسته تقسیم می‌شوند: اول، سناریوهای با کمترین کارایی (سناریوهای ۵، ۷، ۱۰، ۱۱، و ۱۶)؛ دوم، سناریوهای با کارایی متوسط (سناریوهای ۸، ۹، ۱، و ۲)؛ و سوم، سناریوهای با بهترین کارایی (سناریوهای ۱۵، ۱۴، ۱۲، ۱۳، ۴، و ۳). این تقسیم‌بندی بر اساس عملکرد سناریوها در کاهش مصرف کل انرژی است. سناریوهای برتر در همه شهرها و جهات عملکردشان ثابت شده و عامل مشترک بین آنها دمای داخل و بیرون است. سناریوهای که فاقد این دو کنترل هستند، عملکرد ضعیف‌تری دارند. بنابراین، مهم‌ترین محرک‌های کاهش‌دهنده مصرف انرژی، دمای داخل و بیرون هستند که در سناریوهای ۳ و ۴ به‌تنهایی و در سناریوهای ۱۲ تا ۱۵ در ترکیب با تابش خورشیدی استفاده می‌شوند. در ترکیب این دو عامل با تابش خورشیدی عملکرد بهتری را در برخی شهرها و جهات شاهدیم.

35. ASHRAE Standing Standard Project Committee 55. *Cognizant TC: 2.1, Physiology, and Human Environment. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (Ashrae, 2023).

36. Ideal Air Load

37. A. Tabadkani, et al., "A Review of Automatic Control Strategies Based on Simulations for Adaptive Facades", *Building and Environment*, 175 (2020): 106801.

ت ۷. تاثیر متغیرهای پیش‌بینی کننده بر تعداد ساعات ناراضیاتی حرارتی و بصری ساکنان در بهینه‌ترین حالت کنترل‌های تابستانی، تدوین: نگارندگان.

طبق نتایج، سناریوهای مختلف می‌توانند در تابستان بار سرمایشی را بین ۵/۹ تا ۹۹/۳٪ کاهش دهند، بار الکتریکی روشنایی را تا ۸۷/۲٪ افزایش دهند، و مصرف کل انرژی را بین ۳/۴ تا ۷۱٪ کاهش دهند.

۵.۱.۲. ناراضیاتی حرارتی و بصری

این پژوهش با هدف شناسایی سناریوهای بهینه بر اساس دو معیار کلیدی کاهش مصرف کل انرژی و کمینه‌سازی ساعات ناراضیاتی حرارتی و بصری انجام شده است. در این بخش، سناریوها از نظر کاهش ساعات ناراضیاتی حرارتی و بصری مقایسه و بهترین سناریوها شناسایی می‌شوند.

در «ت ۷. الف» کاهش ناراضیاتی حرارتی را در بهترین حالت‌های انتخابی شاهدیم، که شامل سناریوهای ۱۵، ۱۴، ۱۲، ۱۳، ۴، و ۳ است. این سناریوها از نظر کاهش مصرف کل انرژی برتر شناخته شده‌اند. تفاوت‌های جزئی کمتر از ۱٪ در برخی شهرها به جهت‌گیری ساختمان بستگی دارد. به‌منظور سادگی، میانگین درصد کاهش ناراضیاتی حرارتی در چهار جهت‌گیری مختلف مقایسه شده است. به‌طور مثال، در شهرهای یزد و تبریز سناریوی ۴، در ساری سناریوهای ۱۲ و ۱۳، و در بندرعباس سناریوهای ۳ و ۴ بهترین عملکرد را دارند. بنابر نتایج، طراحی و کنترل بهینه سایه‌بان می‌تواند ناراضیاتی

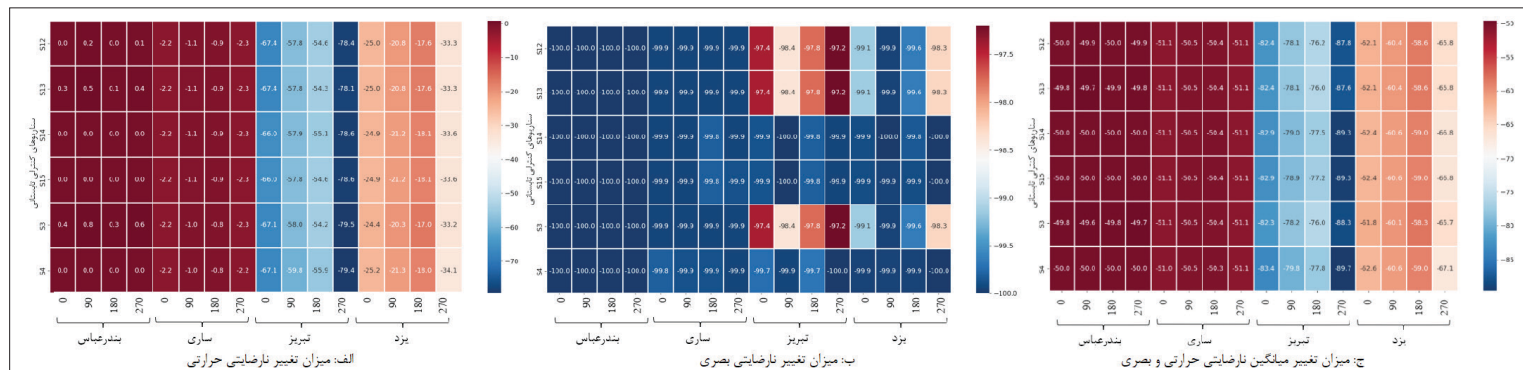
حرارتی را در تابستان تا ۷۹/۵٪ در تبریز کاهش دهد.

«ت ۷. ب» نیز نمایانگر کاهش ناراضیاتی بصری در بهترین حالت‌های انتخابی است. سناریوهای ۴، ۱۴، و ۱۵ برای تبریز و یزد و سناریوهای ۳، ۱۲، و ۱۳ برای بندرعباس و ساری بهترین گزینه‌ها از نظر آسایش بصری هستند. در این حالت‌های بهینه، ناراضیاتی بصری در تابستان بین ۹۷/۲ تا ۱۰۰٪ کاهش یافته است که به معنای تقریباً صفر شدن ساعات ناراضیاتی بصری است.

عملکرد هر سناریو در کاهش ناراضیاتی حرارتی و بصری، بسته به کنترل‌های اعمال‌شده، متفاوت است، و شاید برخی سناریوها در یک جنبه بهتر عمل کنند. درنهایت، تصمیم‌گیری بر اساس میانگین تغییرات در ساعات ناراضیاتی حرارتی و بصری انجام می‌شود (ت ۷. ج).

۶.۱.۲. انتخاب بهینه‌ترین آستانه فعال‌سازی سناریوی کنترلی از منظر مصرف انرژی و آسایش حرارتی و بصری در تابستان

پس از استخراج بهترین حالت هر سناریوی کنترلی از نظر آسایش حرارتی و بصری، بهترین سناریو معرفی می‌شود که نه تنها مصرف انرژی کل، بلکه آستانه فعال‌سازی آن نیز تعداد ساعات ناراضیاتی بصری و حرارتی را به حداقل می‌رساند. در «جدول ۵» بهینه‌ترین



درصد تغییرات ساعات ناراضایتی بصری (%)	درصد تغییرات ساعات ناراضایتی حرارتی (%)	درصد تغییرات مصرف انرژی کل (%)	نقطه تنظیم دمایی (°C)	نقطه تنظیم تابشی (W)	موقعیت سایه بان	سناریو کنترلی تابستانی	اقلیم
۱۰۰	۹,۶	۱۸,۸	۱۵	-	خارجی	S3	بندرعباس
۹۹,۹	۲۱,۸	۳۵,۲	۲۰	-	خارجی	S4	یزد
۹۹,۹	۱,۵	۳۷,۸	۱۵	۰	خارجی	S12 S13	ساری
۹۲,۱	۶۴,۲	۴۵,۵	۲۰,۵	-	خارجی	S4	تبریز

38. EnergyPlus LBNL, "Energy Plus Documentation: Getting Started with Energyplus". EnergyPlus Engineering Reference, Input and Output Reference, 2010.

جدول ۵ (بالا). بهینه‌ترین آستانه فعال‌سازی سناریوی کنترلی از منظر مصرف انرژی و آسایش حرارتی و بصری در تابستان، تدوین: نگارندگان.

ت ۸ (پایین). تاثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بر بار گرمایشی ساختمان در کنترل‌های زمستانی، تدوین: نگارندگان.

۲.۲.۱. بار گرمایشی

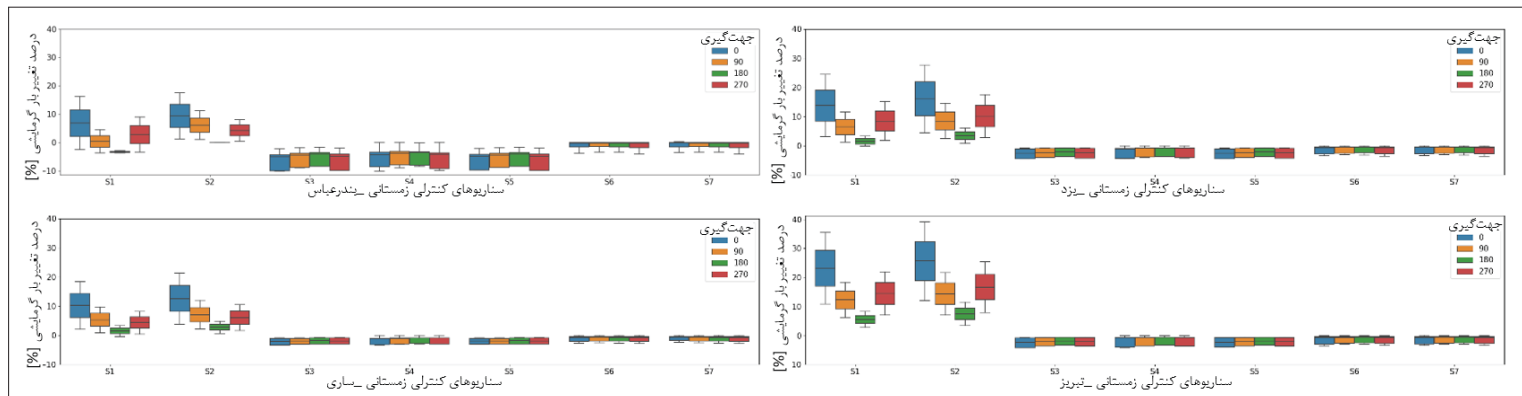
مطابق «ت ۸»، کنترل‌های زمستانی سایه‌بان در بیشتر شهرها تأثیر کمی بر کاهش بار گرمایشی دارند و گاهی در سناریوهای ۱ و ۲، حتی باعث افزایش بار می‌شوند. این تغییرات به نوع کنترل، جهت پنجره، موقعیت سایه‌بان، و اقلیم شهر بستگی دارد. اثربخشی سایه‌بان‌ها در کاهش بار گرمایشی با توجه به اقلیم متفاوت است؛ در اقلیم‌های سرد، مانند تبریز و یزد، کارایی کمتری دارند، درحالی‌که در اقلیم‌های خنک مانند بندرعباس مؤثرترند. این ممکن است به تأثیر بیشتر رسانش گرما از دیوارها نسبت به تابش از پنجره‌ها اشاره داشته باشد.

بنابر «ت ۸»، سناریوهای کنترل زمستانی به سه گروه تقسیم می‌شوند: گروه اول شامل سناریوهای ۱ و ۲ است که تابش خورشیدی را دائماً (S1) یا برای جلوگیری از خیرگی (S2) مسدود می‌کنند، که ممکن است بار گرمایشی را افزایش دهند.

آستانه فعال‌سازی سناریوی برتر همراه با تغییرات مصرف انرژی و ساعات ناراضایتی حرارتی و بصری مشاهده می‌شود.

۲.۲.۲. مقایسه سناریوهای کنترلی زمستانی

این گروه شامل سناریوهای ویژه زمستان و سالانه است که فقط در دوره سرد و برای شهر خاصی مقایسه می‌شود. ابتدا سناریوها بر اساس بار گرمایی و بار روشنایی الکتریکی، و سپس بر اساس کل مصرف انرژی ارزیابی می‌شوند. سناریوهای برتر از نظر کاهش ناراضایتی حرارتی و بصری انتخاب می‌شوند. در این دوره، مصرف انرژی سرمایشی نادیده گرفته شده است. گروه شامل ۷ سناریوست که در «ت ۸» تا «ت ۱۰»، تغییرات درصدی بار گرمایی، بار الکتریکی روشنایی، و کل مصرف انرژی در مقایسه با حالت بدون سایه‌بان (سناریوی مبنا) نشان داده شده است.



ت ۹ (بالا). تأثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بر بار الکتریکی روشنایی ساختمان در کنترل‌های زمستانی، تدوین: نگارندگان.

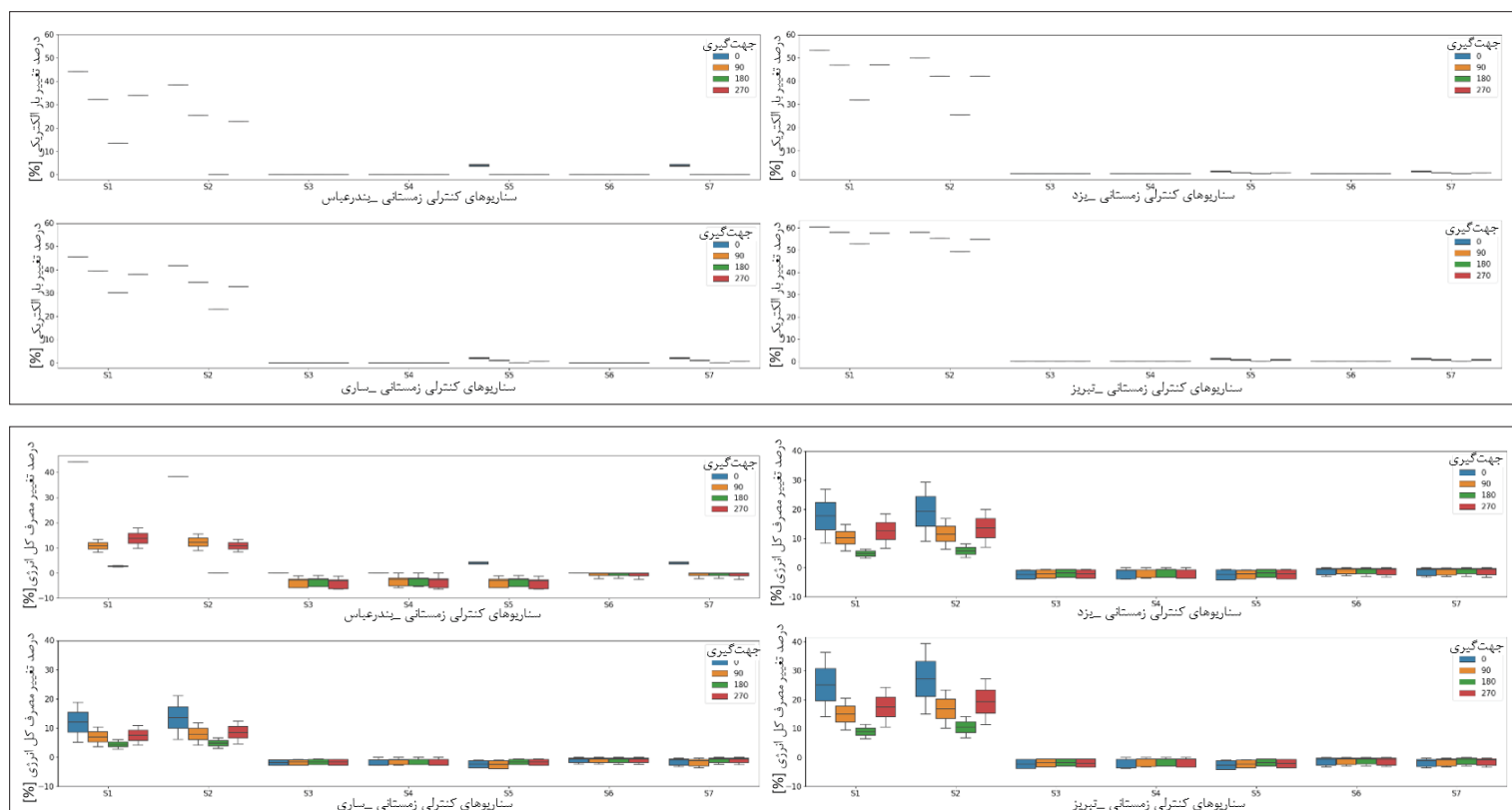
ت ۱۰ (پایین). تأثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بر مصرف کل انرژی ساختمان در کنترل‌های زمستانی، تدوین: نگارندگان.

این سناریوها با چرخش ساختمان به ۱۸۰ درجه و پنجره‌های شمالی کمترین تأثیر منفی دارند. گروه دوم شامل سناریوهای ۶ و ۷ است که با کارایی حرارتی بهتر ۲/۵ تا ۵/۸٪ کاهش بار گرمایشی دارند. گروه سوم شامل سناریوهای ۴، ۳، و ۵ است که به‌طور مؤثر بار سرمایشی را ۲/۹ تا ۱۱/۳٪ کاهش می‌دهند. بررسی سناریوهای برتر نشان می‌دهد که بسته شدن سایه‌بان‌ها بر اساس دمای بیرونی یا داخلی شب‌ها نسبت به بسته شدن آنها برای فعال‌سازی سیستم گرمایش اهمیت بیشتری دارد. در سناریوهای با کارایی متوسط و بالا، سایه‌بان‌های نصب‌شده روی جبهه جنوبی تأثیر کمتری بر کاهش بار گرمایشی دارند. در سناریوهای با کارایی پایین، تأثیر تابش خورشید بر ساختمان‌های

با پنجره‌های جنوبی در زمستان قابل توجه است و مسدود کردن تابش موجب افزایش محسوس بار گرمایشی می‌شود.

۲.۲.۲. بار الکتریکی روشنایی

اجرای سناریوهای ۱ و ۲ منجر به افزایش بار الکتریکی روشنایی می‌شود (ت ۹). در سناریوی ۱، سایه‌بان‌ها همیشه فعال هستند و در سناریوی ۲، به‌دلیل زاویهٔ پایین تابش خورشید در زمستان و خطر خیرگی، سایه‌بان‌ها غالباً فعال می‌شوند که این به افزایش مصرف انرژی الکتریکی برای روشنایی منجر می‌گردد. در مقابل، سناریوهای ۴، ۳، و ۶ که در آنها سایه‌بان‌ها در طول روز باز هستند، هیچ افزایشی در مصرف انرژی نشان نمی‌دهند. همچنین، در



39. Yi Zhang and Ivan Korolija, "Performing Complex Parametric Simulations with Jeplus", In: 9th International Conference on Sustainable Energy Technologies, SET 2010. Shanghai Jiao Tong University: Shanghai, China, 2010.

40. P.O. Fanger, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering* (Danish Technical Press, 1970).

ت ۱۱. تأثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بر بار گرمایشی، بار الکتریکی روشنایی، و مصرف کل انرژی ساختمان در بهینه‌ترین حالت کنترل‌های زمستانی، تدوین: نگارندگان.

۴.۲.۲. انتخاب بهینه‌ترین سناریو از منظر بار گرمایشی، بار الکتریکی روشنایی و مصرف کل انرژی در زمستان

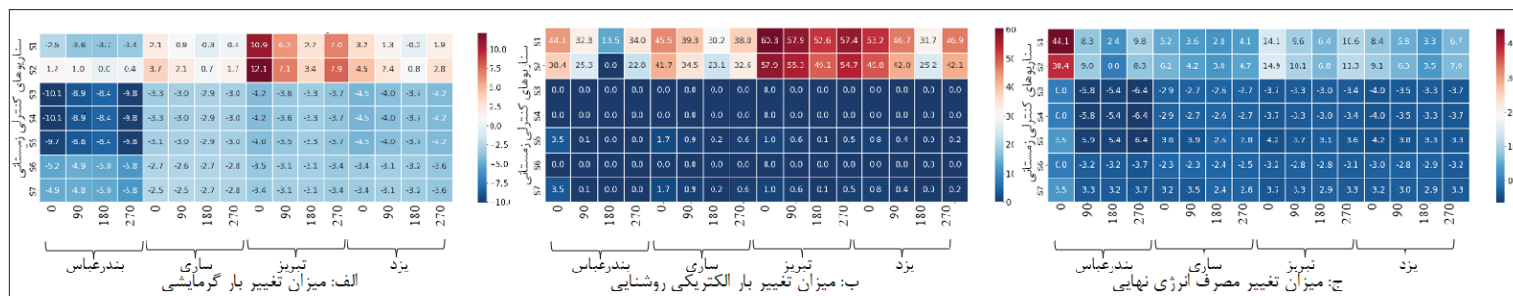
یکی از عوامل تعیین‌کننده در پیش‌بینی عملکرد سناریوهای کنترلی زمستانی، آستانه فعال‌سازی بر اساس نوع محرک کنترلی (دمای داخلی/ خارجی و بار حرارتی) است، بنابراین، بررسی و مقایسه بهینه‌ترین حالت هر کنترل با حالت مبنا اهمیت دارد. این تحلیل به انتخاب بهترین سناریوها برای آسایش بصری و حرارتی کمک می‌کند. بر اساس «ت ۱۱. الف»، سناریوهای ۳، ۴، و ۵ در بهینه‌ترین وضعیتشان در همه شهرها از نظر بار گرمایشی عملکرد بهتری دارند. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر سناریوهای مبتنی بر دما در مقایسه با سناریوهای مبتنی بر بار حرارتی است.

از آنجا که سناریوهای ۳، ۴، و ۶ طول روز باز می‌مانند، هیچ افزایشی در بار الکتریکی روشنایی در مقایسه با حالت مبنا مشاهده نمی‌شود. در مقابل، سناریوی ۱ که سایه‌بان‌ها دائماً بسته هستند و سناریوی ۲ که به خیرگی حساس است، افزایش قابل‌توجهی در بار روشنایی ایجاد می‌کند، این وضعیت در «ت ۱۱. ب» قابل‌مشاهده است. به‌طور استثنای در بندرعباس در جهت ساختمان با پنجره شمالی، بار روشنایی افزایش می‌یابد که ناشی از عرض جغرافیایی پایین این شهر است. بنابراین، سناریوهای کنترلی در این مورد تأثیری بر بار روشنایی ندارند. در سناریوهای ۵ و ۷ نیز، بسته شدن سایه‌بان‌ها، به دلیل تأثیر

سناریوهای ۵ و ۷ که بسته شدن سایه‌بان‌ها به سیستم سرمایش وابسته است (در زمستان کم رخ می‌دهد)، افزایش چشمگیری در مصرف انرژی الکتریکی روشنایی مشاهده نمی‌شود.

۳.۲.۲. مصرف کل انرژی در زمستان

در «ت ۱۰» مصرف انرژی شامل انرژی گرمایشی و الکتریکی روشنایی در شهرهای مختلف مشاهده می‌شود و به افزایش مصرف انرژی با نصب سایبان در زمستان اشاره دارد. سناریوهای ۱ و ۲ با افزایش قابل‌توجه در مصرف انرژی گرمایشی و الکتریکی، بیشترین مصرف کل انرژی را دارند. سایر سناریوها، بدون افزایش چشمگیر در مصرف انرژی الکتریکی، به دو گروه تقسیم می‌شوند: گروهی با کارایی متوسط (سناریوهای ۶ و ۷) و گروهی با کارایی برتر (سناریوهای ۳ و ۴ و ۵). تفاوت‌ها بین این دو گروه در اقلیم بندرعباس بیشتر نمایان است. در سناریوهای برتر، ساختمان‌ها با پنجره‌های شمالی، به دلیل دمای پایین‌تر نسبت به سایر جهت‌گیری‌ها، بار گرمایشی بیشتری دارند. درحالی‌که سناریوهای ضعیف در کاهش مصرف کل انرژی (۱ و ۲)، با جهت‌گیری ۱۸۰ درجه، کمترین افزایش در مصرف کل انرژی را نشان می‌دهند؛ چراکه پنجره‌های شمالی تنها در ساعات محدودی در معرض خیرگی قرار دارند و مصرف انرژی در حالت مبنا بالاست. این نشان‌دهنده تأثیر بیشتر سایه‌بان‌ها در سایر جهت‌گیری‌هاست.



41. R.G. Hopkinson, "Glare from Daylighting in Buildings", *Applied Ergonomics*, vol. 3, no. 4 (1972): 206-215.
42. U.S. Department of Energy. *Energyplus Engineering Reference*. U.S. Department of Energy, 2022.
43. M.C. Peel, et al., "Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, no. 5 (2007): 1633-1644.

ت ۱۲ (بالا). تأثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بر تعداد ساعات ناراضی‌های حرارتی و بصری ساکنان در بهینه‌ترین حالت کنترل‌های زمستانی، تدوین: نگارندگان.

جدول ۶ (پایین). بهینه‌ترین آستانه فعال‌سازی سناریوی کنترلی از منظر مصرف انرژی و آسایش حرارتی و بصری در زمستان، تدوین: نگارندگان.

تبریز این تفاوت برای همه جهت‌گیری‌ها به‌جز پنجره‌های شمالی قابل‌ملاحظه است و در یزد، به‌جز پنجره‌های شرقی، سناریوی ۵ بهترین عملکرد را دارد. به‌طورکلی، یافته‌ها نشان می‌دهند که سناریوی ۵ در کاهش ناراضی‌های حرارتی از سناریوهای ۳ و ۴ برتر است، و بهینه‌سازی طراحی سایه‌بان‌ها می‌تواند ناراضی‌های حرارتی را در زمستان بین ۰/۲ تا ۰/۸٪ کاهش دهد.

«ت ۱۲. ب» می‌بینیم که سناریوی ۵ در کاهش ناراضی‌های بصری نسبت به سناریوهای ۳ و ۴ برتر است. طراحی و کنترل بهینه سایه‌بان‌ها می‌تواند ناراضی‌های بصری را ۰ تا ۰/۳٪ کاهش دهد. همچنین، سناریوی ۵ قابلیت بیشتری در کاهش هم ناراضی‌های حرارتی و هم بصری دارد، که آن را به گزینه‌ای برتر برای انتخاب تبدیل می‌کند. تصمیم‌گیری نهایی بر اساس میانگین تغییرات در این دو عامل صورت می‌پذیرد (ت ۱۲. ج).

۶.۲.۲. انتخاب بهینه‌ترین آستانه فعال‌سازی سناریوی کنترلی از منظر مصرف انرژی و آسایش حرارتی و بصری در زمستان

پس از شناسایی بهینه‌ترین وضعیت هر سناریوی کنترلی از نظر

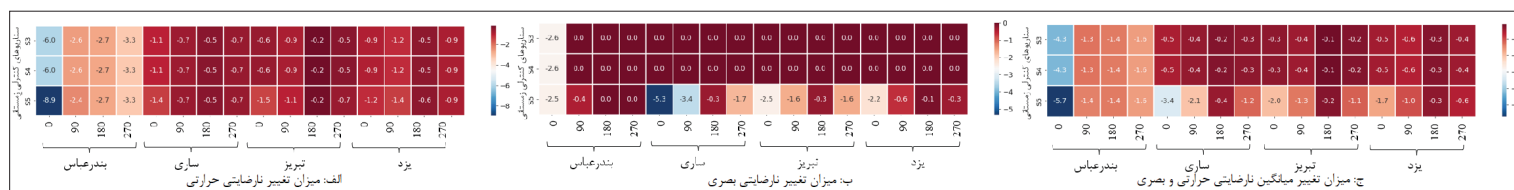
حرارتی، تأثیری بر بار روشنایی نمی‌گذارد.

همان‌طور که در «ت ۱۱. ج» مشاهده می‌شود، بهینه‌ترین حالت‌های سناریوها بر اساس مصرف کل انرژی به سه دسته تقسیم می‌شود: سناریوهای ۱ و ۲ با کارایی ضعیف در کاهش مصرف کل انرژی، سناریوهای ۶ و ۷ با کارایی متوسط، و سناریوهای ۳، ۴، و ۵ که بهترین عملکرد را نشان می‌دهند و در همه شهرها و جهت‌گیری‌ها برتری خاصشان را دارند. با توجه به اختلاف کم بین بهترین حالت‌های سناریوهای ۳، ۴، و ۵، انتخاب برترین سناریو به کاهش ساعات ناراضی‌های حرارتی و بصری وابسته است.

۵.۲.۲. ناراضی‌های حرارتی و بصری

در این مطالعه، پژوهشگران به دنبال یافتن بهترین سناریو با هدف اصلی کاهش مصرف کل انرژی و سپس کاهش ساعات ناراضی‌های حرارتی و بصری هستند. بر این اساس، سناریوها بر پایه کاهش میانگین ساعات ناراضی‌های حرارتی و بصری ارزیابی و مقایسه می‌شوند. در «ت ۱۲. الف» مشاهده می‌شود که در اقلیم‌های بندرعباس و ساری، سناریوی ۵ برای ساختمان‌های با پنجره جنوبی بهتر از سناریوهای ۳ و ۴ عمل می‌کند. در اقلیم

درصد تغییرات ساعات ناراضی بصری (%)	درصد تغییرات ساعات ناراضی حرارتی (%)	درصد تغییرات مصرف انرژی کل (%)	نقطه تنظیم دمایی (°C)	موقعیت سایه‌بان	سناریو کنترلی زمستانی	اقلیم
۰/۶	۴/۳	۳/۵	۶۲	خارجی	S5	بندرعباس
۰/۸	۰/۸	۰/۸	۶۲	داخلی	S5	یزد
۱/۷	۲/۷	۲/۷	۱۷/۵	داخلی	S5	ساری
۱/۰	۱/۵	۱/۵	۵/۱۲	داخلی	S5	تبریز



جدول ۷. مقداردهی اولیه
متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (فیچر)
برای الگوریتم SHAP. تدوین:
نگارندگان.

انرژی مشخص شود. ارزش Shapley نشان می‌دهد که تأثیر هر ویژگی نسبت به سایر ویژگی‌ها در کجا قرار دارد و چگونه تغییرات در هر ویژگی، متغیر هدف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای این منظور، ابتدا مقادیر اولیه هر ویژگی تعیین می‌شود که در «جدول ۷» قابل مشاهده است.

کمبود داده‌های آموزشی می‌تواند به تخمین ناقص از رابطه ورودی / خروجی منجر شود. برای مقابله با این مشکل، اعتبارسنجی متقاطع K برابری (K-Fold-CV) روشی مرسوم

آسایش حرارتی و بصری، سناریویی که نه تنها بیانگر کاهش مصرف کل انرژی در روزهای سرد سال است، بلکه با آستانه فعال‌سازی مناسب، میانگین ساعات ناراضیتی بصری و حرارتی را به حداقل می‌رساند، بهترین انتخاب قلمداد می‌شود. داده‌ها در «جدول ۶» نشان‌دهنده توانایی این سناریو در تأمین هردو جنبه آسایش و کارایی انرژی هستند.

۳.۲. مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی و الگوریتم SHAP

یادگیری ماشین پتانسیل قابل‌توجهی در بهبود عملکرد محصولات، فرایندها، و خدمات دارد. در این فرایند، داده‌ها ورودی به الگوریتم‌ها هستند و خروجی مورد نظر تولید می‌شود. یکی از چالش‌های اصلی این است که در بسیاری از الگوریتم‌ها توضیح روشنی درباره نحوه انجام پیش‌بینی‌ها وجود ندارد؛ موضوعی که می‌تواند مانع پذیرش گسترده آنها در کاربردهای واقعی شود، در چنین شرایطی، مدل‌های قابل تفسیر یادگیری ماشین اهمیت می‌یابند. تفسیرپذیری در یادگیری ماشین امکان درک سازوکار تصمیم‌گیری مدل را فراهم می‌کند. در این راستا، الگوریتم SHAP به کار می‌رود،^{۴۶} که یکی از روش‌های شناخته‌شده برای تفسیر خروجی مدل‌هاست. این الگوریتم بر پایه مفهوم ارزش Shapley در نظریه بازی‌ها توسعه یافته است و سهم نسبی هر ویژگی را در تولید خروجی مدل تعیین می‌کند. با مقایسه عملکرد مدل در بود و نبود هر ویژگی، SHAP میزان تأثیر و اهمیت هر ویژگی را در پیش‌بینی مشخص می‌کند.

در این پژوهش، ابتدا با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، مصرف کل انرژی بر اساس داده‌های آموزشی پیش‌بینی می‌شود. سپس، با استفاده از الگوریتم SHAP، پیش‌بینی‌ها تفسیر می‌شوند تا تأثیر هر متغیر پیش‌بینی‌کننده بر مصرف

مقداردهی برای الگوریتم SHAP		متغیر پیش‌بینی‌کننده:	نوع متغیر پیش‌بینی‌کننده
کنترل سایه‌بان	دما محور	OnIfHighOutdoorAirTemperature	۱
		OnNightIfLowOutdoorTempAndOnDayIfCooling	۲
		OnNightIfLowOutdoorTempAndOffDay	۳
		OnNightIfLowInsideTempAndOffDay	۴
	بار محور	OnIfHighZoneAirTemperature	۵
		OnNightIfHeatingAndOnDayIfCooling	۱
		OnNightIfHeatingAndOffDay	۲
	دما و تابش محور	OnIfHighZoneCooling	۳
		OnIfHighZoneAirTempAndHighSolarOnWindow	۱
		OnIfHighZoneAirTempAndHighHorizontalSolar	۲
		OnIfHighOutdoorAirTempAndHighSolarOnWindow	۳
	تابش محور	OnIfHighOutdoorAirTempAndHighHorizontalSolar	۴
		OnIfHighSolarOnWindow	۱
		OnIfHighHorizontalSolar	۲
		OffNightAndOnDayIfCoolingAndHighSolarOnWindow	۳
		OnNightAndOnDayIfCoolingAndHighSolarOnWindow	۴
موقعیت سایه‌بان	زمستانه - تابستانه	AlwaysOn	۱
		AlwaysOff	۲
		OnIfHighGlare	۳
	اقلیم	بندرعباس	۱
		یزد	۲
		ساری	۳
		تبریز	۴
نوع کنترل	موقعیت سایه‌بان	داخلی	۱
		خارجی	۲
نوع کنترل	موقعیت سایه‌بان	تابستانی	۱
		زمستانی	۲
		سالیانه	۳

44. F. Soflaei, et al., "Investigation of Iranian Traditional Courtyard as Passive Cooling Strategy (a Field Study on Bs Climate)", *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 5, no. 1 (2016): 99-113.
45. S. Firlaq, et al., "Control Algorithms for Dynamic Windows for Residential Buildings", *Energy and Buildings*, 109 (2015): 157-73.
46. S.M. Lundberg and Su-In Lee, "A Unified Approach to Interpreting Model Predictions", *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30 (2017).
47. B. Raton, *Handbook of Quantile Regression* (CRC Press: FL, USA, 2017).

جدول ۸. دقت پیش‌بینی مدل یادگیری ماشین (جنگل تصادفی) و هایپرپارامترهای بهینه آن، تدوین: نگارندگان.

است که در آن داده‌ها به K گروه تقسیم و هر گروه به‌نوبت و با عنوان داده آموزشی و آزمایشی استفاده می‌شود.^{۴۷} معمولاً K برابر با ۵ یا ۱۰ انتخاب می‌شود.^{۴۸} در پژوهش حاضر از اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ برابری استفاده شده است. هایپرپارامترها که ساختار و نحوه آموزش الگوریتم را تعیین می‌کنند، پیش از آموزش تنظیم می‌شوند.^{۴۹} در الگوریتم جنگل تصادفی، هایپرپارامترها شامل عمق درخت و تعداد یادگیرندگان پایه (درخت تصمیم) هستند. در حالت پیش‌فرض از ۱۰۰ درخت تصمیم، بدون محدودیت عمق، استفاده می‌شود. با پارامتریک‌سازی، تعداد یادگیرندگان ضعیف در بازه [۵-۵۰] با گام ۵ و عمق درخت در بازه [۱-۱۰] با گام ۱ تغییر یافته است. بالاترین دقت پیش‌بینی (ضریب R^2) با توجه به این هایپرپارامترها به‌دست آمده است (جدول ۸).

۲.۳.۱. نمودار خلاصه SHAP

نمودارهای خلاصه SHAP ترکیبی از اهمیت و تأثیر هر ویژگی (فیچر) بر پیش‌بینی‌های مدل را نشان می‌دهند. هر نقطه در این نمودار نمایانگر یک مقدار Shapley برای یک ویژگی در موقعیت خاص است. موقعیت نقاط بر محور عمودی (y) نمایانگر ویژگی و بر محور افقی (x) نمایانگر مقدار Shapley است. رنگ هر نقطه نشان‌دهنده مقدار ویژگی است، به‌طوری‌که قرمز مقادیر بالا و آبی مقادیر پایین را می‌نمایانند. نقاط هم‌پوشان در امتداد محور عمودی حرکت می‌کنند تا توزیع مقادیر Shapley برای هر ویژگی را نمایش دهند. ویژگی‌ها بر اساس اهمیتشان

به‌ترتیب نزولی مرتب شده‌اند. این نمودار با استفاده از ۷۰٪ داده‌های آموزشی ساخته شده و اطلاعات زیر را فراهم می‌کند: اهمیت ویژگی: ویژگی‌ها بر اساس اهمیتشان به‌ترتیب نزولی رتبه‌بندی می‌شوند.

تأثیر بر متغیر هدف: محور افقی نشان می‌دهد که تأثیر هر ویژگی بر متغیر هدف، پیش‌بینی‌های بالاتر (مثبت) یا پایین‌تر (منفی) را مرتبط می‌کند.

مقدار اصلی ویژگی: رنگ نقاط نشان‌دهنده مقدار ویژگی است: قرمز برای مقادیر بالا و آبی برای مقادیر پایین.

همبستگی: در مورد کنترل‌های عمومی، نوع کنترل (تابستانی، زمستانی، سالیانه) همبستگی مثبت و تأثیر بالایی بر مصرف انرژی ساختمان دارد. به‌گونه‌ای که با افزایش مقدار Shapley در محور X (پیش‌بینی افزایش متغیر هدف)، مقدار ویژگی (نوع کنترل) نیز با رنگ قرمز افزایش می‌یابد. همه ویژگی‌ها با اعداد ۱، ۲، ۳، و غیره مقداردهی شده‌اند.

در کنترل‌های سالیانه، نوع کنترل (تابستانی یا زمستانی) بیشترین تأثیر را بر مصرف انرژی ساختمان دارد (با قرارگیری در بالاترین جایگاه نمودار در «ت ۱۳»). کنترل‌های تابستانی (نشان داده‌شده با ۱ به رنگ آبی) باعث کاهش مصرف انرژی می‌شوند (مقادیر پایین‌تر SHAPLY در محور X).

دومین عامل مؤثر، اقلیم است. در کنترل‌های دما (و تابش) محور، در اقلیم‌های سردتر مانند ساری (۳) و تبریز (۴) با رنگ مایل به قرمز، مصرف انرژی کمتری مشاهده می‌شود. درحالی‌که در سایر کنترل‌ها، در اقلیم‌های گرم‌تر مانند بندرعباس و یزد (۱) و ۲ با رنگ مایل به آبی) مصرف انرژی کاهش می‌یابد.

موقعیت سایه‌بان و جهت‌گیری ساختمان نیز از عوامل مؤثر دیگر هستند. در کنترل‌های غیرعمومی و بارمحور، موقعیت سایه‌بان اهمیت بیشتری نسبت به جهت‌گیری دارد. سایه‌بان‌های خارجی (نشان داده‌شده با رنگ قرمز) به کاهش

عمق درخت (max_depth)	تعداد تکرار (n_estimator)	ضریب R^2	
		پس از بهینه‌سازی هایپر پارامترها	در حالت پیش‌فرض
۱۰	۲۰	۰.۹۹۹	۰.۹۹۶
۱۰	۳۵	۰.۹۳۹	۰.۸۹۵
۵	۲۵	۰.۹۲۵	۰.۹۰۱
۱۰	۱۰	۰.۹۴۲	۰.۹۳۸
۱۰	۱۱۰	۰.۹۲۲	۰.۹۲۱

مثال در «ت ۱۴ (۱.د)» یک رابطه تقریباً خطی و مثبت بین نقطه تنظیم تابشی و مصرف انرژی نشان داده شده است. این نمودار همچنین نشان می‌دهد که نقطه تنظیم تابشی اغلب با موقعیت سایه‌بان تعامل دارد. وقتی نقطه تنظیم تابشی بیشتر از ۲۰۰ وات بر متر مربع باشد، سایه‌بان‌های داخلی (نشان داده شده با رنگ آبی) در کاهش مصرف انرژی مؤثرند. اما وقتی نقطه تنظیم تابشی کمتر از ۲۰۰ وات بر متر مربع باشد، سایه‌بان‌های خارجی مؤثرتر هستند.

با تجزیه و تحلیل «ت ۱۴ (۱.الف)» تا «ت ۱۴ (۱.ه)» درمی‌یابیم که نقطه تنظیم دمایی کمتر از ۲۸ درجه سانتی‌گراد به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند. به‌ویژه در بازه دمایی ۲۳ تا ۲۶ درجه، کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی مشاهده می‌شود. این تأثیر در کنترل‌های مبتنی بر دما و تابش در بازه ۲۲/۵ تا ۲۵ درجه بیشتر نمایان است. همچنین، تنظیم هم‌زمان نقطه تنظیم تابشی بین ۰ تا ۲۰۰ وات بر متر مربع در کنترل سایه‌بان‌ها به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند. در کنترل‌های مبتنی بر تابش، این موضوع صدق می‌کند. در کنترل‌های مبتنی بر بار، تعیین نقطه تنظیم برای بار سرمایشی یا گرمایشی تا ۷۰۰ وات تأثیر بیشتری دارد، درحالی‌که تأثیر بین ۷۰۰ تا ۱۱۰۰ وات متوسط و بیش از ۱۱۰۰ وات کم است. «ت ۱۴ (۱.ب)» مشاهده می‌شود که در دماهای بالاتر، سایه‌بان‌های داخلی ترجیح داده می‌شوند.

مصرف انرژی کمک می‌کند. تأثیر جهت‌گیری ساختمان نیاز به تحلیل دقیق‌تری دارد که در بخش بعدی بررسی خواهد شد. آستانه‌های تابشی و دمایی نیز تأثیر قابل توجهی دارند. با افزایش آستانه‌های دما و تابش، مصرف انرژی ساختمان افزایش می‌یابد. این نتیجه در کنترل‌های دما و تابش محور قابل تعمیم است. در مقابل، تأثیر آستانه‌های بار سرمایشی یا گرمایشی بر مصرف انرژی ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. نکته پایانی: در کنترل‌های دما (و تابش) محور، کنترل‌هایی که بر مبنای دمای بیرونی (۳ و ۴ با رنگ مایل به قرمز) عمل می‌کنند، مصرف انرژی بیشتری را کاهش می‌دهند. در کنترل‌های تابش محور، کنترل‌هایی که تنها تابش را در نظر می‌گیرند (کنترل‌های ۸ و ۹) و نه شب و روز یا بار سرمایشی (کنترل‌های ۱۰ و ۱۱)، به کاهش بیشتر مصرف انرژی کمک می‌کنند.

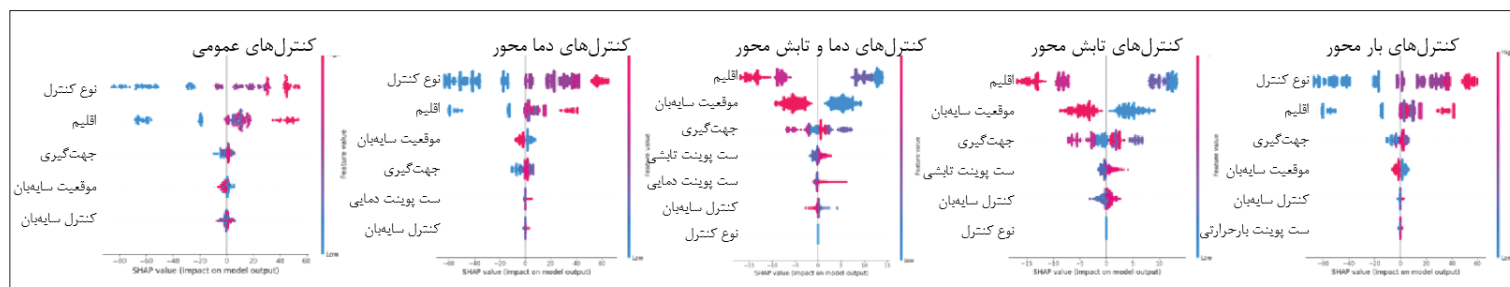
۲.۳.۲. نمودار وابستگی SHAP

نمودار وابستگی SHAP تأثیر یک یا دو ویژگی (فیچر) بر پیش‌بینی‌های مدل‌های یادگیری ماشین را نشان می‌دهد. این نمودار مشخص می‌کند که آیا رابطه بین متغیر هدف و فیچر خطی، یکنواخت، یا پیچیده است و آیا این رابطه مثبت یا منفی است. همچنین این نمودار فیچری که بیشترین تعامل را با فیچر انتخابی دارد، اضافه می‌کند. این تعامل از طریق رنگ آمیزی در محور عمودی نمودار نمایان می‌شود. به‌طور

48. S. Touzani, et al., "Gradient Boosting Machine for Modeling the Energy Consumption of Commercial Buildings". *Energy and Buildings*, 158 (2018): 1533-1543.

49. Bassi et al., "Building Energy Consumption Forecasting: A Comparison of Gradient Boosting Models".

ت ۱۳. جهت و میزان تاثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (فیچر) بر متغیر هدف (مصرف کل انرژی) در نمودار خلاصه SHAP، تدوین: نگارندگان.



در «ت ۱۴ (۲. الف)» تا «ت ۱۴ (۲. ه)» درمی‌یابیم که سایه‌بان‌های خارجی در کاهش مصرف انرژی مؤثرتر از سایه‌بان‌های داخلی هستند. در کنترل‌هایی که موقعیت سایه‌بان‌ها به اقلیم وابسته است، در اقلیم‌های گرم، سایه‌بان‌های خارجی عملکرد بهتری دارند، درحالی‌که در اقلیم‌های سرد، سایه‌بان‌های داخلی مؤثرتر هستند.

در «ت ۱۴ (۳. الف)» تا «ت ۱۴ (۳. ه)»، می‌بینیم که در سیستم‌های کنترلی مبتنی بر تابش و تابش - دما، زون‌های دارای پنجره‌های شمالی کمترین مصرف انرژی را دارند. در مقابل، زون‌های دارای پنجره‌های جنوبی در سایر سیستم‌های کنترلی دارای کمترین مصرف انرژی هستند. زون‌های دارای پنجره‌های غربی در همهٔ موارد بیشترین مصرف انرژی را دارند. «ت ۱۴ (۳. الف)»، «ت ۱۴ (۳. ب)» و «ت ۱۴ (۳. ه)» نمایانگر آن هستند که زون‌های دارای پنجره‌های شمالی در تابستان و زون‌های دارای پنجره‌های جنوبی در زمستان کمترین مصرف انرژی را دارند که این به دلیل میزان دریافت تابش خورشید است. در «ت ۱۴ (۳. ج)» و «ت (۳. د)» می‌بینیم که استفاده از سایه‌بان‌های داخلی برای پنجره‌های شمالی و سایه‌بان‌های خارجی برای پنجره‌های غربی در کاهش مصرف انرژی بهترین عملکرد را دارد.

بر اساس «ت ۱۴ (۴. الف)» تا «ت ۱۴ (۴. ه)»، در کنترل‌های مبتنی بر تابش و تابش - دما، مصرف انرژی در اقلیم‌های سردتر مانند تبریز و ساری کاهش می‌یابد، درحالی‌که در سایر کنترل‌ها در اقلیم‌های گرم‌تر مانند بندرعباس و یزد نیز مصرف انرژی کمتر می‌شود. بنابراین بهتر است که سایه‌بان‌ها در آب‌وهوای گرم با استفاده از آستانه‌های دمایی یا بار گرمایشی / سرمایشی کنترل شوند، و در آب‌وهوای سرد با استفاده از آستانه‌های تابشی کنترل شوند تا بهترین نتیجه در کاهش مصرف انرژی حاصل گردد.

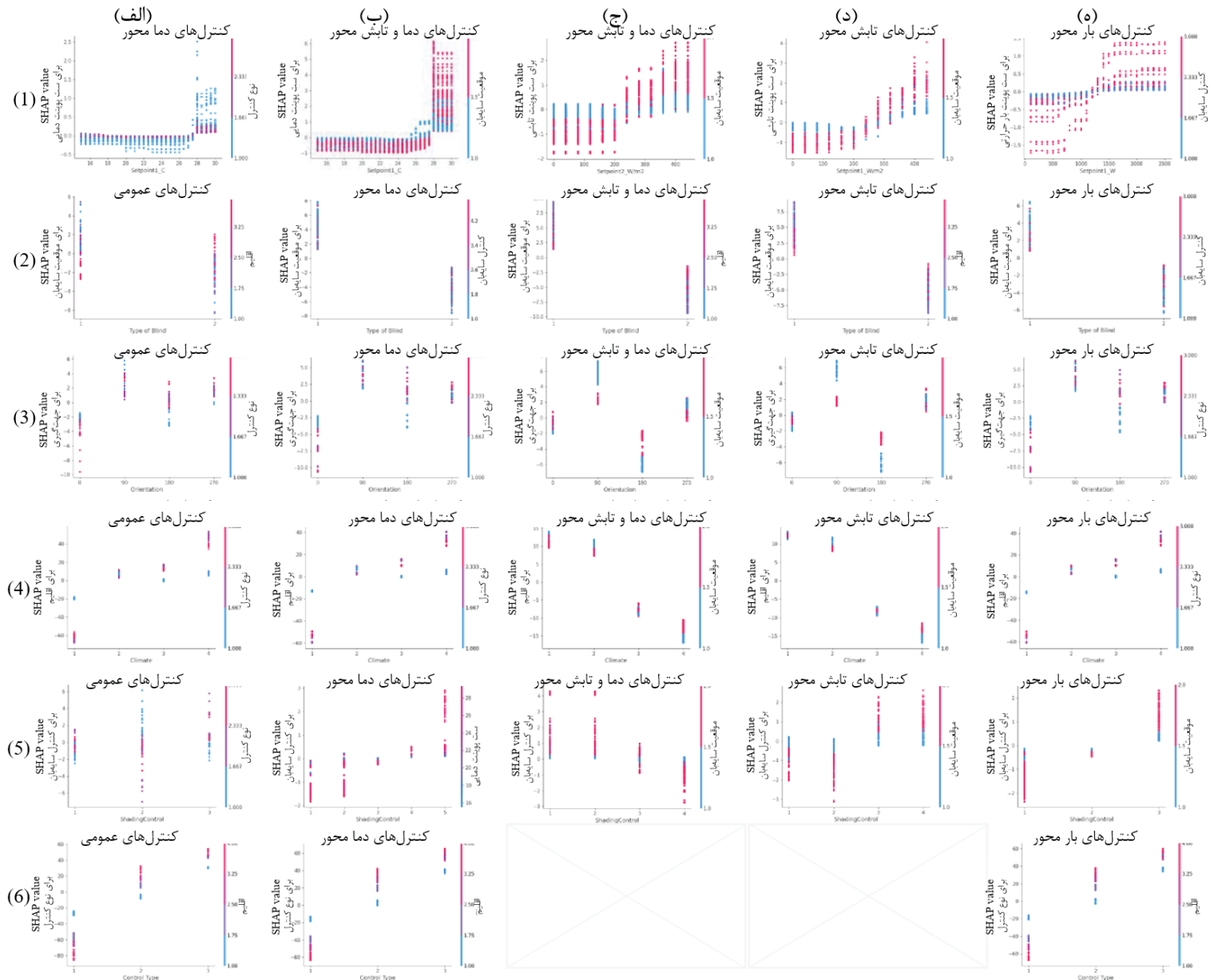
بنابر «ت ۱۴ (۵. الف)»، در سیستم‌های کنترلی عمومی که بدون نقطهٔ تنظیم کنترلی هستند و به صورت دوحالتی (یا همیشه فعال یا همیشه غیرفعال، یا فعال بر اساس نقطهٔ تنظیم خیرگی) عمل می‌کنند، نمی‌توان به نتیجهٔ قطعی رسید؛ چراکه این سیستم‌ها به شرایط مختلف وابسته‌اند. با این حال، سایه‌بان‌های همیشه فعال کمترین مصرف انرژی را دارند و این مصرف بیشتر تحت تأثیر زمان استفاده از سیستم در تابستان، زمستان، یا تمام طول سال قرار دارد. در تابستان، استفاده از سایه‌بان‌های دائماً فعال منجر به کاهش بیشتر مصرف انرژی می‌شود، درحالی‌که سایه‌بان‌های دائماً غیرفعال بیشترین مصرف انرژی را در تابستان دارند.

طبق «ت ۱۴ (۵. ب)»، در سیستم‌های کنترل دما محور، کنترل‌های S3 (تابستانه) و S5 (عمومی) بهترین تأثیر را در کاهش مصرف انرژی دارند. درحالی‌که کنترل‌های S3 (زمستانه) و S4 (زمستانه) اثر متوسطی دارند و کنترل S4 (تابستانه) کمترین تأثیر را به دنبال دارند. این نتایج نشان می‌دهند که سیستم‌های کنترلی با تحریک دمای خارجی تأثیر بیشتری در کاهش مصرف انرژی نسبت به سیستم‌های با تحریک دمای داخلی دارند. همچنین، نقاط تنظیم دمایی بالاتر برای سیستم‌های با تحریک دمای خارجی و نقاط تنظیم دمایی پایین‌تر برای سیستم‌های با تحریک دمای داخلی بهترین عملکرد را دارند.

بر اساس اطلاعات موجود در «ت ۱۴ (۵. ج)»، در سیستم‌های کنترلی که بر اساس هم دما و هم تابش عمل می‌کنند، سیستم‌های کنترلی با محرک دمای خارجی S12 (زمستانه) و S13 (زمستانه) نسبت به سیستم‌هایی که با محرک دمای داخلی S15 (زمستانه) و S14 (زمستانه) کار می‌کنند، به کاهش بیشتر مصرف انرژی کمک می‌کنند. همچنین، تابش افقی نسبت به تابش مستقیم خورشیدی به پنجره‌ها تأثیر

ت ۱۴. جهت و میزان تاثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (فیچر) بر متغیر هدف (مصرف کل انرژی) در نمودار وابستگی SHAP، تدوین: نگارندگان.

بیشتری در کاهش مصرف انرژی دارد.



50. Akhlaghinezhad and Bagheri Sabzevar, "The Effect of Probabilistic Window Opening Behavior of Occupants on Adaptive Thermal Comfort (the Case of Courtyard House in Yazd, Bandar Abbas, and Tabriz)", 252-262.
51. Eh. Naderi, "Multi-Objective Simulation-Based Optimization of Controlled Blind Specifications to Reduce Energy Consumption, and Thermal and Visual Discomfort: Case Studies in Iran", *Building and Environment*, 169 (2020): 106570.
52. A. Figueroa-Lopez, et al., "Evaluation of Passive Strategies, Natural Ventilation and Shading Systems, to Reduce Overheating Risk in a Passive House Tower in the North of Spain During the Warm Season". *Journal of Building Engineering*, 43 (2021): 102607.
53. Tabadkani, et al., "Analysis of the Impact of Automatic Shading Control Scenarios on Occupant's Comfort and Energy Load", 116904.

طبق «ت ۱۴ (۵. د)»، در سیستم‌های کنترلی که مبتنی بر تابش محور هستند، کنترل‌های S9 (زمستانه) و S8 (زمستانه) تأثیر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی دارند، این با دو نوع دیگر کنترل‌ها که شامل کنترل‌های شب و روز یا بار سرمایشی می‌شوند، قابل مقایسه است. مشاهده می‌شود که، تابش افقی در کاهش مصرف انرژی مؤثرتر از تابش مستقیم خورشید به پنجره‌ها است.

در «ت ۱۴ (۵. ه)» مشاهده می‌گردد که کنترل‌های بارمحور سایه‌بان، بارهای گرمایشی و سرمایشی و تفکیک شب و روز S7 (زمستانه)، بیشترین تأثیر را در کاهش مصرف انرژی دارند؛ توصیه می‌شود که آستانه‌ای بیش از ۱۱۰۰ وات در نظر گرفته شود. کنترل S6 (زمستانه) که مبتنی بر تفکیک شب و روز و بار گرمایشی است، تأثیر متوسطی دارد، ولی کنترل S6 (تابستانه) که فقط در بار سرمایشی کار می‌کند، کمترین تأثیر را بر کاهش مصرف انرژی دارد.

بر اساس «ت ۱۴ (۶ الف)»، «ت ۱۴ (۶ ب)» و «ت ۱۴ (۶. ه)»، استفاده از کنترل‌های عمومی، دما محور، و بارمحور به ترتیب در تابستان، زمستان، و کل سال، میزان مصرف انرژی را بیشتر کاهش می‌دهد. کنترل‌های تابستانی در اقلیم‌های سردتر و کنترل‌های زمستانی و سالیانه در اقلیم‌های گرم‌تر کاهش چشمگیری در مصرف انرژی دارند. این به دلیل نزدیک بودن دمای هوا به محدوده آسایش در زمستان در شهرهای گرم و در تابستان در شهرهای سرد است، بنابراین استفاده از سایه‌بان‌ها در این شرایط منطقی‌تر به نظر می‌رسد.

۳. تحلیل

برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار در صنعت ساختمان، بررسی جامع اجزای مختلف ساختمان در مرحله طراحی، با در نظر گرفتن کاربرد آنها، ضروری است. اینجا یک دیدگاه کل نگر

نیاز است که شامل عواملی مانند آسایش بصری، حرارتی، و کاهش مصرف انرژی می‌شود. این مطالعه بر بهینه‌سازی اجزای غیرفعال در ساختمان‌ها، شامل فاکتورهای طراحی و کنترل سایه‌بان‌ها، هم‌راستا با اهداف توسعه پایدار، متمرکز است.

در تابستان، در بندرعباس و ساری، دمای خارجی و در یزد و تبریز، دمای داخلی اهمیت بیشتری دارد. در زمستان، کنترل سایه‌بان بهتر است بر اساس دمای خارجی باشد. این یافته‌ها نتایج تحقیق پیشین نگارندگان^{۵۰} در این باره را تأیید می‌کند که دماهای داخلی و خارجی به ترتیب متغیرهای اصلی برای باز شدن پنجره‌ها در فصول مختلف هستند. پیش‌بینی مصرف انرژی و تحلیل متغیرهای تأثیرگذار نشان می‌دهد که نوع کنترل و شرایط اقلیمی عواملی کلیدی در پیش‌بینی مصرف انرژی هستند که با مطالعات نادری و همکاران^{۵۱} همخوانی دارد. با در نظر گرفتن موقعیت داخلی و خارجی سایه‌بان‌ها، در اکثر موارد، سایه‌بان‌های خارجی مصرف انرژی را بیشتر کاهش می‌دهند که با یافته‌های فیگوروا و همکاران^{۵۲} مطابقت دارد. جهت‌گیری ساختمان نیز یک عامل مهم است؛ زون‌های دارای پنجره‌های شمالی در تابستان و پنجره‌های جنوبی در زمستان کمترین مصرف انرژی را دارند، که با مطالعه تبادکانی و همکاران^{۵۳} تأیید می‌شود.

این یافته‌ها تأکیدی است بر اهمیت در نظر گرفتن موقعیت سایه‌بان، جهت‌گیری ساختمان، و انتخاب استراتژی کنترلی مناسب. نتایج مطالعه پیش رو برای دیگر مناطق مشابه در ایران نیز قابل تعمیم است. این تحلیل‌ها می‌توانند به‌طور عملی در وضع قوانین ساخت‌وساز و بهینه‌سازی ساختمان‌های هوشمند استفاده شوند. صرفه‌جویی انرژی ممکن است باعث تغییر در الزامات انرژی و تشویق کاربران به نصب سایه‌بان‌های هوشمند شود که به توزیع‌کنندگان انرژی یا شرکت‌های خرده‌فروش



را بهبود بخشید و مصرف انرژی را کاهش داد. در تابستان، مصرف انرژی در شهرهای بندرعباس، یزد، ساری، و تبریز به ترتیب ۱۸/۸، ۳۵/۲، ۳۷/۸، و ۴۵/۵٪ کاهش می‌یابد و در زمستان به ترتیب ۴/۳، ۰/۸، ۲/۷، و ۱/۵٪ کاهش نشان می‌دهد. همچنین، طراحی و کنترل بهینه سایه‌بان‌ها نارضایتی حرارتی را به ترتیب در تابستان ۹/۶، ۲۱/۸، ۱/۵، و ۶۴/۲٪ و در زمستان به ترتیب ۳/۵، ۰/۸، ۲/۷، و ۱/۵٪ کاهش می‌دهد. نارضایتی بصری نیز به ترتیب در تابستان ۱۰۰، ۹۹/۹، ۹۹/۹، و ۹۲/۱٪ و در زمستان ۰/۶، ۰/۸، ۱/۷، و ۱/۰٪ کاهش می‌یابد. استفاده از استراتژی کنترل مناسب و انتخاب آستانه فعال‌سازی مناسب نه تنها به کاهش مصرف انرژی می‌انجامد، بلکه آسایش حرارتی و بصری ساکنان را نیز افزایش می‌دهد. در نهایت، از مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی و الگوریتم SHAP برای بررسی تأثیر هر متغیر پیش‌بینی‌کننده بر مصرف انرژی ساختمان استفاده شده است. خلاصه نتایج به شرح زیر است:

۱. سناریوهای تابش‌محور و تابش - دما محور در کاهش بار سرمایشی و سناریوهای دما محور در کاهش مصرف کل انرژی ساختمان در تابستان عملکرد بهتری دارند.
۲. سناریوهای دما محور در کاهش بار گرمایشی و مصرف کل انرژی در زمستان عملکرد بهتری دارند.
۳. در تابستان، در اقلیم بندرعباس، سایه‌بان‌های خارجی با کنترل دمای بیرون (S3) و آستانه فعال‌سازی ۱۵ درجه سانتی‌گراد، در اقلیم‌های یزد و تبریز، سایه‌بان‌های خارجی با کنترل دمای داخل (S4) و آستانه‌های ۲۰ و ۲۰/۵ درجه سانتی‌گراد، و در اقلیم ساری، سایه‌بان‌های خارجی با کنترل دمای بیرون و تابش خورشیدی (S12، S13) و آستانه‌های فعال‌سازی ۱۵ درجه سانتی‌گراد و صفر وات بر متر مربع برای تابش خورشیدی بهترین عملکرد را از نظر مصرف کل انرژی،

انرژی در کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند.

پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که عملکرد سایه‌بان‌های خودکار از لحاظ انرژی و نور روز مؤثرتر از نوع دستی است. این پژوهش با بررسی ۱۹ استراتژی کنترلی خودکار، کاربرد زیادی دارد. با این حال، محدودیت‌های تحقیق حاضر، از جمله آزادی عمل ساکنان در کنترل سایه‌بان‌ها، که در برخی شرایط می‌تواند آزاردهنده باشد و به نارضایتی آنها منجر شود، قابل توجه است. همچنین، مبحث حریمیت در کاربری مسکونی در ایران اهمیت زیادی دارد که می‌تواند تأثیر سایر پارامترها را کاهش دهد. تفاوت‌های احتمالی بین داده‌های اقلیمی واقعی و داده‌های آبهوایی انرژی پلاس نیز ممکن است به اختلاف نتایج شبیه‌سازی با واقعیت منجر شود. علاوه بر این، محدودیت‌های کنترل پره‌های سایه‌بان به صورت ۰ یا ۹۰ درجه و مدل‌سازی سیستم تهویه مکانیکی ایدئال در این پژوهش، نیاز به بهبود در تحقیقات آینده دارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله بر سناریوهای کنترلی سایه‌بان، موقعیت، و جهت‌گیری آن تمرکز شده است. به منظور بهینه‌سازی و طراحی پارامتریک، از نرم‌افزار انرژی پلاس به همراه جی‌پلاس استفاده شده است. متغیرهای پیش‌بینی‌کننده شامل موقعیت سایه‌بان (داخلی یا خارجی)، جهت‌گیری ساختمان، استراتژی کنترلی، نقطه تنظیم، و اقلیم هستند. همچنین، توابع هدف شامل بار سرمایشی، گرمایشی، بار الکتریکی روشنایی، مصرف کل انرژی، و تعداد ساعات نارضایتی حرارتی و بصری ساکنان هستند.

نتایج نشان دادند که با استفاده از استراتژی کنترلی مناسب و انتخاب آستانه فعال‌سازی صحیح در طراحی و کنترل سایه‌بان‌ها، می‌توان شرایط آسایش حرارتی و بصری

آسایش حرارتی، و بصری دارند.

۴. در زمستان، در همهٔ اقلیم‌ها، سناریوی کنترلی (S5) با کنترل دمای بیرون و آستانه‌های فعال‌سازی ۲۶، ۲۶، ۱۷/۵، و ۲۱/۵ برای اقلیم‌های بندرعباس، یزد، ساری، و تبریز، بهترین عملکرد را در مصرف انرژی، آسایش حرارتی، و بصری نشان می‌دهد.

۵. موقعیت بهینهٔ سایه‌بان در اقلیم بندرعباس برای زمستان خارجی و در سایر اقلیم‌ها داخلی است.

۶. تأثیر طراحی و کنترل سایه‌بان بر مصرف انرژی، آسایش حرارتی، و بصری ساکنان در زمستان نسبت به تابستان کمتر است.

۷. کنترل سایه‌بان‌ها برای کاهش بار گرمایشی در تابستان ممکن است منجر به افزایش بار الکتریکی روشنایی شود، درحالی‌که در زمستان بار گرمایشی و الکتریکی روشنایی همسو عمل می‌کنند.

۸. نوع کنترل و شرایط اقلیمی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در پیش‌بینی مصرف انرژی هستند.

۹. در بیشتر تکرارهای شبیه‌سازی، سایه‌بان‌های خارجی در کاهش مصرف انرژی مؤثرتر هستند.

۱۰. برای پنجره‌های شمالی، استفاده از سایه‌بان داخلی و برای پنجره‌های غربی، استفاده از سایه‌بان خارجی توصیه می‌شود.

۱۱. در اقلیم‌های گرم، سایه‌بان‌های خارجی و در اقلیم‌های سرد، سایه‌بان‌های داخلی عملکرد بهتری دارند.

۱۲. آستانهٔ تابشی نسبت به آستانهٔ دمایی در کنترل‌های تابش و دما محور اهمیت بیشتری دارد.

۱۳. با افزایش آستانهٔ تابشی بیشتر از ۲۰۰ وات و آستانهٔ دمایی بیش از ۲۶ درجه، مصرف انرژی افزایش می‌یابد.

۱۴. کنترل‌های مبتنی بر دمای خارجی به‌طور کلی نسبت به کنترل‌های مبتنی بر دمای داخلی عملکرد بهتری دارند.

۱۵. کنترل‌های مبتنی بر تابش افقی نسبت به کنترل‌های

54. Probabilistic

55. Deterministic

تابش برخوردی بر پنجره‌ها عملکرد بهتری دارند.

۱۶. آستانهٔ بار گرمایشی یا سرمایشی بین ۰ تا ۱۱۰۰ وات بیشترین تأثیر را بر مصرف انرژی دارد.

۱۷. استفاده از کنترل‌های تابش محور برای سایه‌بان‌های پنجرهٔ شمالی توصیه می‌شود.

۱۸. زون‌های دارای پنجرهٔ شمالی در تابستان و پنجرهٔ جنوبی در زمستان مصرف انرژی کمتری دارند. بنابراین، با جابه‌جایی فصلی می‌توان شاهد کاهش مصرف انرژی در طول سال بود.

۱۹. در اقلیم‌های گرم، کنترل سایه‌بان‌ها باید بر اساس آستانه‌های دمایی یا بار گرمایشی و سرمایشی باشد، درحالی‌که در اقلیم‌های سرد، کنترل بر اساس آستانهٔ تابشی، جهت کاهش مصرف انرژی مناسب‌تر است.

۲۰. برای کنترل‌های مبتنی بر دمای خارجی، آستانه‌های دمایی بالاتر مناسب‌تر هستند، درحالی‌که برای کنترل‌های مبتنی بر دمای داخلی، آستانه‌های دمایی پایین‌تر ترجیح داده می‌شوند.

۲۱. در اقلیم‌های سرد، کنترل‌های تابستانی و در اقلیم‌های گرم، کنترل‌های زمستانی و سالیانه تأثیر بیشتری در کاهش مصرف انرژی دارند.

در پژوهش‌های آینده لازم است روند تحقیقاتی حاضر در ساختمان‌های غیرفعال (با شرایط آسایش حرارتی تطبیقی و بدون استفاده از سیستم تهویه مطبوع) نیز بررسی شود؛ به‌ویژه، تقسیم سایه‌بان‌ها به قسمت‌های مختلف برای کنترل‌های مجزا و بررسی تأثیر زاویه‌های میانی می‌تواند نتایج مقایسه‌ای مفیدی را موجب شود. همچنین، مطالعات بیشتر در زمینهٔ الگوریتم‌های کنترلی سایه‌بان می‌تواند به پیاده‌سازی راه‌حل‌های هوشمند جدید مانند پنجره‌های خودکار و تهویهٔ طبیعی منجر شود. بررسی نتایج این پژوهش با سیستم‌های تهویهٔ مطبوع رایج در کاربری مسکونی نیز ضروری است. در پژوهش‌های مشابه که کنترل‌های احتمالی^{۵۴} به‌همراه در نظر گرفتن رفتار ساکنان



References

- Ahmad, Muhammad Waseem, Monjur Mourshed, and Yacine Rezgui. "Trees vs Neurons: Comparison between Random Forest and Ann for High-Resolution Prediction of Building Energy Consumption". *Energy and Buildings*, 147 (2017): 77-89.
- Akhlaghinezhad, F. and H. Bagheri Sabzevar. "The Effect of Probabilistic Window Opening Behavior of Occupants on Adaptive Thermal Comfort (the Case of Courtyard House in Yazd, Bandar Abbas, and Tabriz)". *Iranica Journal of Energy & Environment*, vol. 14, no. 3 (2023): 252-262.
- Akhlaghinezhad, Fateme, Amir Tabadkani, Hadi Bagheri Sabzevar, Nastaran Seyed Shafavi, and Arman Nikkhah Dehnavi. "Deterministic and Probabilistic Occupant-Centric Control's Impacts on the Indoor Environment in Free-Running Households". *Smart and Sustainable Built Environment*, no. ahead-of-print (2024). <https://doi.org/10.1108/sasbe-10-2023-0316>.
- Araya, Daniel B, Katarina Grolinger, Hany F. ElYamany, Miriam A.M. Capretz, and Girma Bitsuamlak. "An Ensemble Learning Framework for Anomaly Detection in Building Energy Consumption". *Energy and Buildings*, 144 (2017): 191-206.
- ASHRAE Standing Standard Project Committee 55. *Cognizant TC: 2.1, Physiology, and Human Environment. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Ashrae, 2023.
- Balador, Zahra, Fatemeh Imani, and Morten Gjerde. "Evaluation of Different Shading Devices for a Tehran Primary School Classroom". Paper presented at the PLEA Conf, 2017.
- Bassi, Abnash, Anika Shenoy, Arjun Sharma, Hanna Sigurdson, Connor Glossop, and Jonathan H. Chan. "Building Energy Consumption Forecasting: A Comparison of Gradient Boosting Models". Paper presented at the Proceedings of the 12th International Conference on Advances in Information Technology, 2021.
- Bustamante, Waldo, Daniel Uribe, Sergio Vera, and Germán Molina. "An Integrated Thermal and Lighting Simulation Tool to Support the Design Process of Complex Fenestration Systems for Office Buildings". *Applied Energy*, 198 (2017): 36-48.
- Dokhanian, Fahimeh, Mostafa Mohajerani, Hassan Estaji, and Morteza Nikravan. "Shading Design Optimization in a Semi-Arid Region: Considering Energy Consumption, Greenhouse Gas Emissions, and Cost". *Journal of Cleaner Production*, 428 (2023): 139293.
- Fanger, Poul O. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press, 1970.
- Figuerola-Lopez, Anna, Alba Arias, Xabat Oregi, and Iñigo Rodríguez. "Evaluation of Passive Strategies, Natural Ventilation and Shading Systems, to Reduce Overheating Risk in a Passive House Tower in the North of Spain During the Warm Season". *Journal of Building Engineering*, 43 (2021): 102607.
- Firląg, Szymon, Mehrangiz Yazdani, Charlie Curcija, Christian Kohler, Simon Vidanovic, Robert Hart, and Stephen Czarnecki. "Control Algorithms for Dynamic Windows for Residential Buildings". *Energy and Buildings*, 109 (2015): 157-173.
- Garcia, Dayan de Loyola Ramos and Fernando Oscar Ruttkay Pereira. "Method Application and Analyses of Visual and Thermal-Energy Performance Prediction in Offices Buildings with Internal Shading Devices". *Building and Environment*, 198 (2021): 107912.
- Haghighi, Nasim, Somayeh Asadi, and Hamed Babaizadeh. "The Effect of Shading Design and Materials on Building Energy Demand". International Construction Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering (ICSC), 2015.
- Hopkinson, Ralph Galbraith. "Glare from Daylighting in Buildings". *Applied Ergonomics*, vol. 3, no. 4 (1972): 206-215.
- Kim, Dongsu, Sam J. Cox, Heejin Cho, and Jongho Yoon. "Comparative Investigation on Building Energy Performance of Double Skin Façade (Dsf) with Interior or Exterior Slat Blinds". *Journal of Building Engineering*, 20 (2018): 411-423.
- LBNL, EnergyPlus. "Energy Plus Documentation: Getting Started with Energyplus". *EnergyPlus Engineering Reference, Input and Output Reference*, 2010.
- Light, CEN. "Lighting—Basic Terms and Criteria for Specifying Lighting Requirements". *European Standard EN 12665*, 2011.
- Littlefair, P.J. *Control of Solar Shading*. BRE, 2002.
- Lundberg, Scott M. and Su-In Lee. "A Unified Approach to Interpreting Model Predictions". *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30 (2017).
- Magri Elouadjeri, Sahar, Aicha Boussoulaim, and Hassan Ait Haddou. "Evaluating the Effect of External Horizontal Fixed Shading Devices' Geometry on Internal Air Temperature, Daylighting and Energy Demand in Hot Dry Climate; Case Study of Ghardaia, Algeria". *Buildings*, vol. 11, no. 8 (2021): 348.
- Naderi, Ehsan, Behrang Sajadi, Mohammadali Akhavan Behabadi, and Erfan Naderi. "Multi-Objective Simulation-Based Optimization of Controlled Blind Specifications to Reduce Energy Consumption, and Thermal and Visual Discomfort: Case Studies in Iran". *Building and Environment*,

169 (2020): 106570.

National Building Regulations of Iran. Chapter 19: Energy Conservation. *Tehran, Iran: Iranian National Building Regulations*, 2020.

Newsham, GR. "Manual Control of Window Blinds and Electric Lighting: Implications for Comfort and Energy Consumption". *Indoor Environment*, vol. 3, no. 3 (1994): 135-144.

Neymark, J., R. Judkoff, M. Kummert, R. Muehleisen, A. Johannsen, N. Kruis, Jason Glazer, et al. *Update of ASHRAE Standard 140 Section 5.2 and Related Sections (Bestest Building Thermal Fabric Test Cases)*. Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), 2020.

O'Donovan, Adam, Michael D Murphy, and Paul D O'Sullivan. "Passive Control Strategies for Cooling a Non-Residential Nearly Zero Energy Office: Simulated Comfort Resilience Now and in the Future". *Energy and Buildings*, 231 (2021): 110607.

Oh, Myung Hwan, Kwang Ho Lee, and Jong Ho Yoon. "Automated Control Strategies of inside Slat-Type Blind Considering Visual Comfort and Building Energy Performance". *Energy and Buildings*, 55 (2012): 728-737.

Peel, Murray C., Brian L. Finlayson, and Thomas A. McMahon. "Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification". *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, no. 5 (2007): 1633-1644.

Pinto, Maria Cristina, Giulia Crespi, Federico Dell'Anna, and Cristina Becchio. "Combining Energy Dynamic Simulation and Multi-Criteria Analysis for Supporting Investment Decisions on Smart Shading Devices in Office Buildings". *Applied Energy*, 332 (2023): 120470.

Raton, Boca. *Handbook of Quantile Regression*. CRC Press: FL, USA, 2017.

Sanati, Leyla, and Michael Utzinger. "The Effect of Window Shading Design on Occupant Use of Blinds and Electric Lighting". *Building and Environment*, 64 (2013): 67-76.

Santos, Matheus Tonelli, Maria Akutsu, and Adriana Camargo de Brito. "Method for Determining the Efficiency of Shading Devices". Paper presented at the 50th International Conference of the Architectural Science Association, 2016.

Shen, Eric, Maulin Patel, and Jia Hu. "Comparison of Energy and Visual Comfort Performance of Independent and Integrated Lighting and Daylight Controls Strategies". Paper presented at the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry, 2013.

Skarning, Gunnlaug Cecilie Jensen, Christian Anker Hviid, and Svend Svendsen. "The Effect of Dynamic Solar Shading on Energy, Daylighting and Thermal Comfort in a Nearly Zero-Energy Loft Room in Rome and Copenhagen". *Energy and Buildings*, 135 (2017): 302-311.

Soflaei, Farzaneh, Mehdi Shokouhian, and Seyed Majid Mofidi Shemirani. "Investigation of Iranian Traditional Courtyard as Passive Cooling Strategy (a Field Study on Bs Climate)".

International Journal of Sustainable Built Environment, vol. 5, no. 1 (2016): 99-113.

Tabadkani, Amir, Astrid Roetzel, Hong Xian Li, and Aris Tsangrassoulis. "A Review of Automatic Control Strategies Based on Simulations for Adaptive Facades". *Building and Environment*, 175 (2020): 106801.

Tabadkani, Amir, Astrid Roetzel, Hong Xian Li, and Aris Tsangrassoulis. "A Review of Occupant-Centric Control Strategies for Adaptive Facades". *Automation in Construction*, 122 (2021): 103464.

Tabadkani, Amir, Astrid Roetzel, Hong Xian Li, Aris Tsangrassoulis, and Shady Attia. "Analysis of the Impact of Automatic Shading Control Scenarios on Occupant's Comfort and Energy Load". *Applied Energy*, 294 (2021): 116904.

Tan, Yutong, Jinqing Peng, Yimo Luo, Jing Gao, Zhengyi Luo, Meng Wang, and Dragan C. Curcija. "Parametric Study of Venetian Blinds for Energy Performance Evaluation and Classification in Residential Buildings". *Energy*, 239 (2022): 122266.

Touzani, Samir, Jessica Granderson, and Samuel Fernandes. "Gradient Boosting Machine for Modeling the Energy Consumption of Commercial Buildings". *Energy and Buildings*, 158 (2018): 1533-1543.

U.S. Department of Energy. *Energyplus Engineering Reference*. U.S. Department of Energy, 2022. URL: <https://energyplus.net>.

Van Den Wymelenberg, Kevin. "Patterns of Occupant Interaction with Window Blinds: A Literature Review". *Energy and Buildings*, 51 (2012): 165-176.

Winter, Eyal. "The Shapley Value". *Handbook of Game Theory with Economic Applications*, 3 (2002): 2025-2054.

Xiong, Jie and Athanasios Tzempelikos. "Model-Based Shading and Lighting Controls Considering Visual Comfort and Energy Use". *Solar Energy*, 134 (2016): 416-428.

Zhang, Liang, Jin Wen, Yanfei Li, Jianli Chen, Yunyang Ye, Yangyang Fu, and William Livingood. "A Review of Machine Learning in Building Load Prediction". *Applied Energy*, 285 (2021): 116452.

Zhang, Yi, and Ivan Korolija. "Performing Complex Parametric Simulations with Jeplus". In: 9th International Conference on Sustainable Energy Technologies, SET 2010. Shanghai Jiao Tong University: Shanghai, China, 2010.

Zhong, Xuyang, Zhiang Zhang, Wei Wu, and Ian Ridley. "Comprehensive Evaluation of Energy and Indoor-Pm2.5-Exposure Performance of Residential Window and Roller Blind Control Strategies". *Energy and Buildings*, 223 (2020): 110206.

Zhou, Nan, Lynn Price, Dai Yande, Jon Creyts, Nina Khanna, David Fridley, Hongyou Lu, et al. "A Roadmap for China to Peak Carbon Dioxide Emissions and Achieve a 20% Share of Non-Fossil Fuels in Primary Energy by 2030". *Applied Energy*, 239 (2019): 793-819.