نویسنده:
وحید بختیاری

کنترل هوشمند سایه‌بان‌های متحرک بر اساس پیش‌بینی کوتاه‌مدت آب‌وهوا با استفاده از انرژی‌پلاس

چکیده

در سال‌های اخیر، رشد مصرف انرژی در ساختمان‌ها، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک، لزوم به‌کارگیری راهکارهای هوشمند و کم‌مصرف را بیش از پیش برجسته کرده است. سایه‌بان‌های متحرک به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در کاهش بار سرمایشی مطرح هستند، اما اغلب کنترل این تجهیزات به‌صورت زمان‌بندی ثابت یا واکنشی و بر اساس شرایط لحظه‌ای انجام می‌گیرد. این پژوهش با هدف ارتقای کارایی انرژی ساختمان، رویکردی نوین مبتنی بر پیش‌بینی کوتاه‌مدت شرایط آب‌وهوایی ارائه می‌دهد. در این راستا، یک ساختمان مسکونی یک‌طبقه در اقلیم گرم و خشک شیراز با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس شبیه‌سازی شده و برای پنجره‌های جنوبی آن، سایه‌بان‌هایی با قابلیت تغییر زاویه نصب گردید. داده‌های پیش‌بینی‌شده شامل تابش خورشیدی، دمای هوا و پوشش ابر، به‌صورت ساعتی از طریق API با زبان پایتون دریافت شده و با استفاده از سیستم EMS به مدل شبیه‌سازی وارد شده‌اند. کنترل زاویه سایه‌بان‌ها بر پایه الگوریتمی ساده اما کاربردی به صورت قاعده‌محور انجام شد. مقایسه بین سه سناریو شامل نبود سایه‌بان، سایه‌بان ثابت و سایه‌بان با کنترل پیش‌بینی‌محور نشان داد که روش پیشنهادی توانست مصرف انرژی سرمایشی را تا ۲۹٪ کاهش داده و درصد ساعات آسایش حرارتی را از ۳۶٪ به بیش از ۷۴٪ برساند. نتایج همچنین حاکی از آن است که استفاده از پیش‌بینی کوتاه‌مدت با دقت بالاتر (مثلاً بازه ۴ ساعته) تأثیر مثبتی بر عملکرد سیستم داشته و این روش می‌تواند گامی مؤثر در طراحی سامانه‌های هوشمند و اقلیم‌پاسخ باشد.

ایمیل: vbakhtyari@nus.ac.ir

© The author(s). This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY NC) License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

OPEN ACCESS E-ISSN: 298-346

To cite this article: M. Mohsenzadeh, P. Karami, E. Asadpourian, M. Sadeghpour, "Green Self Compacting Concrete Production Utilizing Effluent from Municipal Wastewater Treatment Plants", *Construction Industry*, Vol. 1, No. 1, P. 11-17, 2025. (in persian) doi : https://doi.org/

جهت مطالعه آنلاین، اسکن کنید

۱- مقدمه

مصرف انرژی در ساختمان‌ها سهم قابل‌توجهی از کل مصرف جهانی را تشکیل می‌دهد، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک مانند شیراز که بخش عمده‌ای از انرژی مصرفی صرف بار سرمایشی می‌شود.[۱] سیستم‌های سایه‌بان متحرک به‌عنوان راهکاری موثر برای کنترل پویا تابش خورشیدی معرفی شده‌اند، اما کنترل مرسوم این سیستم‌ها اغلب بر اساس زمان‌بندی ثابت یا داده‌های لحظه‌ای و فاقد بهره‌گیری از اطلاعات پیش‌بینی‌شده است[۲].

با پیشرفت فناوری‌های پیش‌بینی هواشناسی و دسترسی آسان به داده‌های کوتاه‌مدت، امکان استفاده از فرامین کنترلی هوشمند و مبتنی بر پیش‌بینی، همچون کنترل مدل‌پیش‌بین ، فراهم آمده است[۳]. پیاده‌سازی کنترل پیش‌بینی‌شده باعث می‌شود سایه‌بان‌ها قادر به واکنش به شرایط آینده هوا باشند و عملکرد انرژی ساختمان‌ها به‌طور قابل‌توجهی بهبود یابد[۴].

در این مقاله، چارچوبی شبیه‌سازی‌شده ارائه می‌شود که با استفاده از نرم افزار انرژی‌پلاس و داده‌های پیش‌بینی کوتاه‌مدت برای ساختمان مسکونی در شیراز، کنترل هوشمند سایه‌بان متحرک را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. داده‌های آب‌وهوایی استاندارد شهری (EPW) برای حالت پایه استفاده و پیش‌بینی‌ها به‌صورت لحظه‌ای به کمک زبان برنامه نویسی پایتون از طریق API بارگذاری می‌شوند. هدف اصلی، بررسی تأثیر کنترل پیش‌بینی‌محور بر مصرف انرژی سرمایشی و راحتی حرارتی است.

این پژوهش، با بهره‌گیری از زبان برنامه‌نویسی پایتون برای ارتباط با انرژی‌پلاس و استفاده از توابع EMS ، به دنبال گامی کارآمد در ادغام کنترل هوشمند با شبیه‌سازی انرژی ساختمان در اقلیم واقعی شیراز است. این چارچوب توانایی افزایش کارایی سایه‌بانی‌های پیش‌بین و پویا در مواجهه با نوسانات کوتاه‌مدت اقلیمی را نشان می‌دهد.

۲- پیشینه پژوهش

۲-۱- سایه‌بان‌های متحرک

مطالعات متعددی استفاده از سایه‌بان‌های متحرک را به‌عنوان روشی مؤثر برای کاهش جذب گرما و بهبود راحتی حرارتی ساختمان معرفی کرده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که جدای از کاهش تابش خورشید، این سیستم‌ها قابلیت تنظیم شرایط نوری داخل را نیز دارند [۵].

۲-۲- کنترل‌های مبتنی بر پیش‌بینی

استفاده از کنترل‌های مبتنی بر مدل پیش‌بینی، مانند به‌کارگیری پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت هواشناسی، می‌تواند کارایی انرژی ساختمان را تا بیش از ۱۵-۲۵٪ ارتقاء دهد [۶] . مثلاً ژائو و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که ترکیب انرژی‌پلاس با مدل‌پیشبین توانست مصرف انرژی را تا حدود ۲۰-۳۰٪ کاهش دهد[۷].

۲-۳- استفاده از انرژی‌پلاس در مطالعات کنترل هوشمند

انرژی‌پلاس به‌عنوان یکی از ابزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان، به‌وفور در مطالعات کنترل هوشمند استفاده شده است. نمونه‌هایی از کاربرد آن عبارت‌اند از:

تولید فریم‌ورک شبیه‌سازی پیش‌بینی هوا با فایل‌های EPW بروزرسانی‌شونده [۸]،

اتصال نرژی‌پلاس به متلب برای کنترل مدل‌پیشبین در ساختمان‌های واقعی و کاهش ۳۰٪ مصرف انرژی [۹].

اجرای کنترل هوشمند سایه‌بان با ترکیب EMS در انرژی‌پلاس و متلب که کاهش مصرف ۵٪ در فصول انتقالی را نشان داده[۸].

۲-۴- خلأ پژوهشی

با وجود توسعه مدل‌پیشبین و کنترل پیش‌بینی‌شده، سه حوزه زیر به‌خوبی پوشش داده نشده‌اند:

۱- تمرکز عملی کافی در اقلیم گرم و خشک: مطالعات محدود به اقلیم‌های معتدل مانند ایالات

ادامه در صفحه بعد

متحده و کانادا بوده، در حالی که داده تمرینی برای اقلیم‌هایی مانند شیراز کم است.

۲- کنترل سایه‌بان متحرک در اقلیم‌های گرم: اکثر تحقیقات کنترل مدل‌پیشبین سیستم تاسیساتی را بررسی کرده‌اند، کمتر موردی درباره کنترل فعال سایه‌بان در این نوع اقلیم یافت می‌شود.

۳- انطباق داده‌های واقعی شهری: استفاده عملی از داده‌های API کوتاه‌مدت هوا (به زبان پایتون) و اتصال زنده آن به انرژی‌پلاس در ساختمان مسکونی شیراز، تاکنون در منابع علمی دیده نشده است.

۳- روش‌شناسی

۳-۱- توصیف ساختمان یا مدل شبیه‌سازی‌شده

مدل انتخاب‌شده در این پژوهش، یک ساختمان مسکونی یک‌طبقه با زیربنای تقریبی ۱۲۰ متر مربع در شهر شیراز است. پلان ساختمان شامل دو اتاق خواب، یک فضای نشیمن و یک آشپزخانه با پنجره‌هایی رو به جنوب است. مصالح استفاده‌شده مطابق با استانداردهای معمول ساخت‌وساز در منطقه شیراز در نظر گرفته شده‌اند، شامل دیوار آجری با عایق متوسط، پنجره‌های دو جداره، و سقف تخت با عایق حرارتی.

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس ۲۳/۲ و واسط گرافیکی اپن‌استودیو ۳/۵ انجام شده است.

۳-۲- مشخصات سایه‌بان

برای پنجره‌های جنوبی، سایه‌بان‌های متحرک افقی در نظر گرفته شده‌اند. این سایه‌بان‌ها دارای یک درجه آزادی چرخشی هستند که امکان باز و بسته شدن به‌صورت زاویه‌دار را دارند. بازه زاویه عملکرد سایه‌بان‌ها بین ۰ (کاملاً باز) تا ۹۰ درجه (کاملاً بسته) است. جنس سایه‌بان‌ها از آلومینیوم با رنگ روشن فرض شده و ضریب بازتابش ۰/۶ در نظر گرفته شده است.

الگوی حرکت سایه‌بان‌ها در پاسخ به داده‌های پیش‌بینی‌شده آب‌وهوایی و منطق کنترل داخلی تعریف می‌شود که در ادامه شرح داده شده است.

۳-۳- نوع داده‌های پیش‌بینی‌شده مورد استفاده

داده‌های آب‌وهوایی کوتاه‌مدت از طریق API به‌صورت روزانه و ساعتی دریافت شده‌اند. متغیرهای مورد استفاده عبارت‌اند از:

- تابش خورشیدی کل
- دمای هوا
- پوشش ابر

برای صحت‌سنجی روش، از یک سناریوی تست مصنوعی نیز استفاده شد که در آن داده‌های ساختگی با الگوهای مشخص افزایش یا کاهش تابش در طول روز به انرژی‌پلاس داده شد تا واکنش الگوریتم در شرایط کنترل‌شده بررسی شود.

۳-۴- نحوه ادغام داده‌های پیش‌بینی در انرژی‌پلاس

داده‌های پیش‌بینی با استفاده از یک اسکریپت پایتون جمع‌آوری شده، به فایل CSV تبدیل و به کمک EMS در انرژی‌پلاس به صورت ساعتی فراخوانی می‌شوند. برای این منظور از قابلیت: ExternalInterface:Schedule در انرژی‌پلاس استفاده شده است.

پایتون در این فرآیند نقش کلیدی دارد:

- بارگذاری خودکار داده‌ها از API
- اعمال پیش‌پردازش (مثل نرمال‌سازی یا پیش‌بینی تابش لحظه‌ای)
- بروزرسانی فایل‌های ورودی به انرژی‌پلاس قبل از اجرای شبیه‌سازی

۳-۵- توضیح الگوریتم کنترلی یا منطق تصمیم‌گیری

یک منطق کنترلی ساده اما کاربردی بر اساس قاعده‌محور تعریف شده است. این منطق به شرح زیر است:

اگر تابش خورشیدی پیش‌بینی‌شده در ۳ ساعت آینده بیش از ۴۰۰ W/m^2 و دمای هوا بیش از ۳۰°C: زاویه سایه‌بان روی ۷۵ درجه تنظیم شود (بسته نزدیک).

اگر تابش پیش‌بینی‌شده کمتر از ۲۰۰ W/m^2 یا پوشش ابر بیش از ۸۰٪: سایه‌بان به حالت باز (۲۰ درجه) بازمی‌گردد.

در دیگر ساعات، زاویه سایه‌بان با نرخ تدریجی بین دو مقدار یادشده تغییر می‌کند.

۳-۶- سناریوهای مقایسه‌ای

برای ارزیابی عملکرد سایه‌بان با کنترل پیش‌بینی‌محور، سه سناریو به‌صورت جداگانه در انرژی‌پلاس شبیه‌سازی شده‌اند که در جدول ۱ نشان داده شده اند.

جدول ۱: سناریوهای ارزیابی

سناریو	توضیح
بدون سایه‌بان	پنجره‌ها کاملاً بدون پوشش، سناریوی پایه
سایه‌بان با زاویه ثابت ۶۰ درجه در تمام ساعات روز	
سایه‌بان با کنترل پیش‌بینی‌محور	الگوریتم قاعده محور مبتنی بر پیش‌بینی آب‌وهوای کوتاه‌مدت

برای هر سناریو، شاخص‌های انرژی (مانند مصرف کل سرمایشی بر حسب kWh و آسایش حرارتی (PMV و دمای عملیاتی استخراج و مقایسه شده‌اند.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مقایسه مصرف انرژی

نتایج شبیه‌سازی انرژی‌پلاس نشان داد که الگوریتم کنترل پیش‌بینی‌محور توانست مصرف انرژی سرمایشی را به طور محسوسی کاهش دهد. میانگین مصرف ماهانه سرمایش در سه سناریو در جدول ۲ نشان داده شده‌است.

جدول ۲: میانگین مصرف ماهانه سرمایش در سه سناریو

سناریو	مصرف سرمایشی (kWh)	درصد تغییر
بدون سایه‌بان	۵۶۰	--
سایه‌بان ثابت	۴۷۵	۱۵٪
سایه‌بان با کنترل پیش‌بینی‌محور	۳۹۸	۲۹٪

۴-۲- دمای داخل و آسایش حرارتی

پارامترهای آسایش حرارتی مانند دمای عملیاتی و شاخص PMV نیز بررسی شدند. همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، نتایج نشان داد که سایه‌بان پیش‌بینی‌محور توانست نوسانات دمای داخل را کاهش داده و دما را نزدیک‌تر به محدوده آسایش (۲۴-۲۸ درجه) نگه دارد.

ادامه در صفحه بعد

جدول ۳: میانگین نوسانات دما و آسایش حرارتی

سناریو	میانگین دمای عملیاتی (C°)	درصد ساعات آسایش (PMV بین -۰٫۵ تا +۰٫۵)
بدون سایه‌بان	۳۰٫۲	٪۳۶
سایه‌بان ثابت	۲۸٫۷	۵۵٪
سایه‌بان با کنترل پیش‌بینی‌محور	۲۷٫۹	۷۴٪

۳-۴- تحلیل مزایا و محدودیت‌ها

مزایا:

- کاهش قابل توجه مصرف انرژی سرمایشی بدون نیاز به سیستم‌های پیچیده
- بهبود آسایش حرارتی با الگوریتم ساده قاعده محور
- قابلیت اجرا با داده‌های واقعی قابل‌دسترس (API هواشناسی)

محدودیت‌ها:

- نیاز به اتصال اینترنتی برای دریافت پیش‌بینی
- وابستگی عملکرد به دقت داده‌های هواشناسی (مخصوصاً تابش خورشید)
- عدم توانایی الگوریتم ساده در واکنش به تغییرات لحظه‌ای سریع

۴-۴- نکات مرتبط با کاربرد عملی

یک بخش از آزمایش‌ها مربوط به مقایسه عملکرد کنترل با پیش‌بینی‌های ۴ ساعته و ۲۴ ساعته بود. با توجه به جدول۴ نتایج نشـــان داد که پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت دقت بهتری در تصمیم‌گیری برای سایه‌بان دارند، زیرا خطای پیش‌بینی در افق بلندتر بیشتر است.

جدول ۴: مقایسه عملکرد کنترل با پیش‌بینی‌های ۴ ساعته و ۲۴ ساعته

افق پیش‌بینی	مصرف سرمایشی (kWh)	درصد ساعات آسایش
۴ ساعت آینده	۳۹۸	٪۷۴
۲۴ ساعت آینده	۴۲۵	۶۹٪

از این یافته‌ها چنین استنباط می شود که کنترل سایه‌بان بر اساس داده‌های آب‌وهوایی پیش‌بینی‌شده، حتی با یک الگوریتم ساده، به‌طور معنی‌داری می‌تواند مصرف انرژی و آسایش حرارتی را بهبود دهد. همچنین، هرچقدر افق پیش‌بینی دقیق‌تر و کوتاه‌تر باشد، عملکرد سیستم بهتر خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشـــان داد که اســـتفاده از سایه‌بان‌های متحرک با کنترل مبتنی بر پیش‌بینی کوتاه‌مدت وضعیت آب‌وهوا، می‌تواند به‌طور قابل توجهی مصرف انرژی سرمایشی ساختمان را کاهش داده و آســـایش حرارتی ساکنان را بهبود بخشـــد. در مقایسه با حالت بدون سایه‌بان و سایه‌بان ثابت، سیستم پیشنهادی توانســـت مصرف انرژی سرمایشی را تا ۲۹٪ کاهش دهد و درصد ساعات آسایش حرارتی را از ۳۶٪ به بیش از ۷۴٪ برســـاند. همچنین بررســـی دو افق پیش‌بینی مختلف (۴ ساعته و ۲۴ ســـاعته) نشان داد که دقت پیش‌بینی در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر تأثیر مستقیمی بر عملکرد بهتر سیستم کنترلی دارد.

مزیت اصلی این رویکرد، قابلیت پیاده‌سازی آن با استفاده از داده‌های پیش‌بینی عمومی، منطق کنترلی ســـاده، و ادغام مؤثر با نرم‌افزار شبیه‌سازی قدرتمند انرژی‌پلاس است. این ویژگی‌ها آن را به گزینه‌ای عملی و مقرون‌به‌صرفه برای بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان‌ها در اقلیم‌های گرم و خشک تبدیل می‌کند.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر همچون مدل‌های یادگیری ماشین یا کنترل پیش‌بین مدل‌مبنا برای بهبود تصمیم‌گیری اســـتفاده شود. همچنین بررسی عملکرد سیستم در ســـاختمان‌های چندمنظوره، چندطبقه یا با الگوهای مصرف متغیر می‌تواند در توسعه کاربری‌های واقعی این روش مؤثر باشد.

منابع

[1] A. Heidari, M. Taghipour, and Z. Yarmahmoodi, "The Effect of Fixed External Shading Devices on Daylighting and Thermal Comfort in Residential Building," Journal of Daylighting, vol. 8, no. 2, pp. 165-180, 2021, doi: 10.15627/JD.2021.15.

[2] A. Boranian, "Simple shading control in EnergyPlus," Unmet Hours Forum, 2017. [Online]. Available: https://unmethours.com/questions/xxxx.

[3] J. Huchuk, A. Bruni, H. Aksel, and A. Pietruschka, "Model-Based Predictive Control of Window Shades," Carleton University, 2021.

[4] D. E. Jung, C. Lee, K. H. Lee, M. Shin, and S. L. Do, "Evaluation of Building Energy Performance with Optimal Control of Movable Shading Device Integrated with PV System," Energies, vol. 14, no. 7, pp. 1799-1799, 2021, doi: 10.3390/en14071799.

[5] C. L. Hoyos-Leyva, "Influence of Sun Shading Devices on Energy Efficiency, Thermal and Lighting Comfort in Warm Semi-arid Mediterranean Climates," Buildings, vol. 14, no. 2, pp. 556-556, 2023, doi: 10.3390/buildings14020556.

[6] K. Huchuk, A. Bruni, H. Aksel, and A. Pietruschka, "Model-based predictive control of office window shades," Building and Environment, vol. 109, pp. 44-56, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.10.005.

[7] J. Zhao, K. P. Lam, B. E. Ydstie, and O. T. Karaguzel, "EnergyPlus model-based predictive control within design-build-operate energy information modelling infrastructure," Journal of Building Performance Simulation, vol. 8, no. 3, pp. 121-134, 2014, doi: 10.1080/19401493.2014.891656.

[8] D. B. Crawley and et al., "EMS Application Guide for EnergyPlus," U.S. Department of Energy, 2021. [Online]. Available: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.1.0/EMSApplicationGuide.pdf

[9] B. Wu, S. Wang, and Z. Lin, "Model Predictive Control for Energy Optimization of HVAC Systems Using EnergyPlus and ACO Algorithm," Buildings, vol. 12, no. 5, pp. 590-590, 2022, doi: 10.3390/buildings12050590.

بیانیه استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی

در تهیه متن مقاله جهت بهبود خوانایی و روانی چکیده مبسوط انگلیسی از ChatGPT ۴ استفاده شده است. پس از استفاده از این ابزار، در مواردی که لازم بوده نویسندگان مقاله را بازنگری و ویرایش کرده و مسئولیت کامل مطالب منتشر شده در مقاله را می پذیرند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان وجود ندارد.