



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Model-based Building Retrofit: Experiences at Sharif University of Technology

Abbas Rajabi-Ghahnavieh^{a,*}, Morteza Haddadi^b

^a Assistant Professor, Faculty of Energy Engineering, Sharif University of Technology

^b PhD student of Energy Systems Engineering, Faculty of Energy Engineering, Sharif University of Technology

PAPER INFO

Paper history:

Received: 04 July 2022

Revised: 11 June 2023

Accepted: 18 July 2023

Keywords:

Building, Energy,
Retrofit,
Model,
Calibration.

ABSTRACT

This paper presents a model-based technique for building retrofit planning. The approach is based on the building energy model. An algorithm has been developed to calibrate building energy model based on hourly data. The calibrated model is used to select candidate retrofit actions and assess the energy saving potential associated with each candidate action. The proposed technique has been applied for retrofit planning in Department of Energy Engineering (DOEE) at the Sharif University of Technology in 2015. A smart reading system has been also developed to capture the hourly gas consumption for DOEE. Building energy model for DOEE has been developed in EnergyPlus and calibrated using the proposed algorithm. A set of retrofit action has been selected and implemented in DOEE based on the proposed technique. The results showed that the average cooling energy use in summers was reduced by 20% compared to the 6-year average summer energy use before retrofit. The results showed that only HVAC control has more than 8% impact on cooling energy use.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.24094.2122>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: rajabi@sharif.edu

How to cite this article:

Rajabi-Ghahnavieh, A., & Haddadi, M. (2023). Model-based Building Retrofit: Experiences at Sharif University of Technology. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(75), 239-254. doi: 10.22075/jme.2023.24094.2122

بهسازی ساختمان بر مبنای مدل: تجربه دانشگاه صنعتی شریف

عباس رجیبی قهنویه^{۱*}، مرتضی حدادی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۳	در این مقاله به تشریح روش بهسازی ساختمان بر مبنای مدل به منظور کاهش مصرف انرژی و تجربه بکارگیری آن در دانشکده مهندسی انرژی دانشگاه صنعتی شریف می‌پردازد. تحلیل پتانسیل و انتخاب گزینه‌های بهسازی ساختمان بر مبنای مدل مصرف انرژی ساختمان در محیط نرم افزار انرژی پلاس انجام شد. به کمک الگوریتم پیشنهادی، پارامترهای مدل انرژی ساختمان بر مبنای مصارف ساعتی انرژی ساختمان تنظیم شده و مدل مورد صحت سنجی قرار گرفت. به منظور استخراج مصارف ساعتی گاز مصرفی، نسبت به توسعه و استقرار سامانه خوانش هوشمند کنتور گاز اقدام شد. بر مبنای مدل مصرف انرژی، پتانسیل‌های کاهش مصرف ناشی از گزینه‌های مختلف بهسازی ساختمان مورد ارزیابی قرار گرفته و پیاده سازی شد. پس از اجرای بهسازی، به ارزیابی اثربخشی اقدامات انجام شده بر مبنای مصارف واقعی انجام گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد بار سرمایه انرژی مصرفی برای سرمایه‌های ساختمان طی دو سال پس از انجام بهسازی به میزان ۲۰ درصد از متوسط شش سال گذشته کمتر بوده است. مشخص شد کنترل عملکرد سیستم تهویه مطبوع به تنهایی منجر به کاهش ۸ درصد در مصرف انرژی ساختمان می‌شود. موفقیت الگوریتم پیشنهادی در تنظیم مدل حرارتی ساختمان نیز با توجه نتایج بهسازی مورد تایید مجدد قرار گرفت.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷	
واژگان کلیدی:	
ساختمان، بهسازی، انرژی، مدلسازی، تنظیم مدل.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.24094.2122>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه^۱

طی ساعات مختلف روز را تجربه می‌کنند [۳]، ساختمان‌های اداری و تجاری دارای ساعات مشخص حضور افراد طی روزهای مشخص هفته است [۴]. تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی تجاری و اداری منتشر شده‌است. برخی از پژوهش‌ها، بر تاثیر طراحی و پوسته ساختمان بر مصرف انرژی پرداخته‌اند [۵-۷]. در حالیکه، پژوهش‌های دیگر بر توسعه مدل‌ها، روش‌ها و رویکردهایی به منظور ارزیابی و پیش‌بینی تقاضای انرژی

برآورد می‌شود مصرف انرژی در ساختمان‌ها معادل بیش از ۳۰ درصد از مصرف انرژی اولیه در جهان را به خود اختصاص داده باشد [۱]. سهم عمده مصرف انرژی در ساختمان صرف تهویه مطبوع (گرمایش، سرمایش و تامین هوای تازه) می‌شود تا شرایط آسایش برای ساکنان حفظ شود [۲]. نیاز انرژی تهویه مطبوع در ساختمان به شدت به الگوی حضور در ساختمان وابسته است. در حالیکه ساختمان‌های خانگی حضور کمابیش همیشگی ساکنان ساختمان متمرکز هستند [۸-۱۳].

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: rajabi@sharif.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

۲. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

استناد به این مقاله:

رجیبی قهنویه، عباس، و حدادی، مرتضی. (۱۴۰۲). بهسازی ساختمان بر مبنای مدل: تجربه دانشگاه صنعتی شریف. مدل سازی در مهندسی، ۲۱(۷۵)، ۲۳۹-۲۵۴. doi: 10.22075/jme.2023.24094.2122

تابستان ۲۰۱۵ (۱۳۹۴) شامل سه مرحله زیر اجرا شد:

- تدوین و تنظیم مدل انرژی ساختمان
- برنامه‌ریزی و پیاده‌سازی اقدامات بهسازی
- اندازه‌گیری و صحت‌سنجی

نکته متمایز روش بکارگیری شده در بهسازی دانشکده، توسعه مدل انرژی و تنظیم آن با داده‌های عملیاتی است. مدل انرژی تنظیم شده برای ساختمان در مرحله بعد به منظور برنامه‌ریزی اقدامات بهسازی ساختمان مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور با استفاده از مدل، مجموعه‌ای از اقدامات بهسازی و کنترل به منظور کاهش مصرف انرژی مورد سنجش قرار گرفت. پس از انتخاب اقدامات بهسازی بر مبنای سنجش انجام شده توسط مدل، اقدامات مذکور پیاده‌سازی شده و در مرحله سوم اثربخشی آنها هم با مدل شبیه‌سازی انرژی و هم بر مبنای مصارف واقعی ساختمان مورد سنجش قرار گرفت.

این مقاله به تشریح روش‌ها، مدل‌ها و تجارب توسعه یافته در اجرای پروژه بهسازی ساختمان دانشکده مهندسی انرژی می‌پردازد. در این پروژه، یک مدل تفصیلی انرژی ساختمان در محیط انرژی پلاس تهیه شد که در برگیرنده جزئیات پوسته و تجهیزات تهویه مطبوع است. پارامترهای مدل مذکور بر مبنای اطلاعات ساعتی مصرف گاز طبیعی تنظیم و راستی‌آزمایی مدل انجام شد. استخراج مصارف ساعتی گاز طبیعی با توسعه سامانه خوانش هوشمند انجام گرفت. سپس اقدامات بهسازی بر مبنای پارامترهای مدل حرارتی، انتخاب و پیاده‌سازی شد. نتایج اقدامات نیز بر مبنای مدل حرارتی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت.

نوآوری‌های مقاله حاضر به شرح زیر است:

- تشخیص پتانسیل‌های بهینه‌سازی ساختمان بر مبنای مدل حرارتی؛
- کالبراسیون مدل حرارتی ساختمان بر مبنای مصارف ساعتی و ارائه روشی نوین جهت کالبراسیون مدل که بصورت مجزا مصارف شبانه و روزانه را ارزیابی میکند؛
- صحت‌سنجی نتایج بهینه‌سازی ساختمان بر مبنای مدل حرارتی.

سازماندهی مقاله به صورت زیر است: در بخش دو ساختمان دانشکده مهندسی انرژی و سیستم تهویه مطبوع آن معرفی شده است. روش پیشنهادی برای تنظیم مدل انرژی

به صورت مشخص، قابلیت نرم افزار انرژی پلاس^۲ [۱۴] در مدل‌سازی، تحلیل و شبیه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان به خوبی در پروژه‌های مرتبط با پایش و مدیریت مصرف انرژی ساختمان نشان داده شده است [۱۵-۱۷].

در برخی پژوهش‌ها به مدل‌سازی، ارزیابی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری پرداخته شده است. در مرجع [۱۸] از نرم افزار انرژی پلاس برای ارزیابی پتانسیل‌های کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری در اتحادیه اروپا استفاده شده است. در یک پروژه واقعی در مرجع [۱۹]، مدل‌های نرم افزار انرژی پلاس توسعه داده شده است. اثر رفتار ساکنان در شبیه‌سازی ساختمان در یک پروژه واقعی در [۲۰] لحاظ شده است.

از سوی دیگر، بهسازی ساختمان^۳ بعنوان یک رویکرد کلی در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های موجود شناخته می‌شود [۲۱-۲۳]. اصلاح پوسته ساختمان [۲۱]، استفاده از ذخیره یخ در سیستم سرمایش [۲۴] یا افزودن نماهای دو پوسته [۲۵] از جمله اقدامات بهسازی ساختمان است که مستلزم ایجاد تغییرات اساسی و صرف هزینه بسیار است. کنترل مناسب تجهیزات خانه هوشمند [۲۶] و بویژه تجهیزات سیستم تهویه مطبوع [۲۷ و ۲۸] نیز در زمره اقدامات بهسازی ساختمان به شمار می‌روند.

با این حال، اندازه‌گیری و صحت‌سنجی مدیریت انرژی و میزان اثربخشی آن ناشی از اقدامات بهسازی یک چالش اساسی در مدیریت انرژی در ساختمان است. از آنجا که اقدامات بهسازی ساختمان مستلزم صرف هزینه است، هرگونه چالش در سنجش اثربخشی اقدامات بهسازی می‌تواند کلیت مساله بهسازی را تحت تاثیر قرار دهد [۲۹-۳۱].

به طور کلی، کالبراسیون مدل شبیه‌سازی انرژی ساختمان یک فرآیند مهم برای شبیه‌سازی انرژی ساختمان است، بنابراین مطالعات مختلفی در مورد این موضوع بحث شده است [۳۲-۳۳].

ساختمان دانشکده مهندسی انرژی در دانشگاه صنعتی شریف جزو جدیدترین ساختمان‌های آموزشی در ایران است. بکارگیری گسترده شیشه در نمای ساختمان منجر به مصرف قابل ملاحظه انرژی در فصل تابستان شده است.

به منظور کاهش مصرف انرژی و با اتخاذ رویکردی علمی، برنامه بهسازی ساختمان دانشکده مهندسی انرژی در

³ Building Retrofit

² EnergyPlus

ساختمان دانشکده مهندسی انرژی در بخش شمالی پردیس اصلی دانشگاه صنعتی شریف در شهر تهران قرار گرفته است. بخش اصلی ساختمان از دو بلوک قرینه شمالی و جنوبی تشکیل شده که به وسیله کریدورهایی به یکدیگر مرتبط است. شکل (۱) ساختمان دانشکده را نشان می دهد که در آن نماهای جنوبی و شرقی بلوک جنوبی ساختمان و همچنین بخشی از بلوک شمالی مشاهده دیده می شود. ورودی ساختمان در طبقه همکف و به سمت شرق قرار دارد.

ساختمان در بخش ۳ توضیح داده شده است. بکارگیری روش پیشنهادی و تدوین سناریوهای بهسازی برای ساختمان دانشکده انرژی در بخش ۴ آورده شده است. در بخش ۵ گزارش اجرای طرح بهسازی و در بخش ۶ تحلیل نتایج آمده است. در بخش ۷، نتایج حاصل از بهسازی با سایر کارهای مشابه مقایسه شده است. بخش هشتم حاوی نتیجه گیری و پیشنهادات است.

۲- معرفی ساختمان دانشکده مهندسی انرژی



شکل ۱- ساختمان دانشکده مهندسی انرژی

جهت‌های مختلف ساختمان است.

جدول ۱- مساحت بخش‌های پوسته ساختمان

مجموع	غرب	جنوب	شرق	شمال	
۴۹۲۸	۱۲۴۸	۱۲۱۶	۱۲۴۸	۱۲۱۶	دیوار (م.م)
۱۷۳۱	۱۶۰	۵۹۸/۴	۳۷۴/۷	۵۹۸/۴	پنجره (م.م)
۳۵	۱۲/۸۲	۴۹/۲۱	۳۰/۰۲	۴۹/۲۱	پنجره (درصد)

با توجه به اطلاعات ارائه شده در ستون آخر جدول ۱، مشاهده می شود که قریب ۳۵ درصد کل سطح جانبی دانشکده از نمای شیشه‌ای تشکیل شده که میزانی بسیار بیشتر از مقادیر استاندارد است.

همچنین، همانطور که در شکل (۱) دیده می شود، ساختمان دانشکده به هیچ ساختمان دیگری متصل نیست. از این رو، ساختمان از تمام جهات جانبی در معرض تغییرات

بخش اصلی ساختمان دارای دو بلوک شمالی و جنوبی و زیربنایی معادل ۳۰۷۶۲ مترمربع است که در ۵ طبقه شامل زیر زمین، طبقه همکف و سه طبقه روی همکف بنا شده است.

آمفی تئاتر و کتابخانه دانشکده در دو طبقه و با مجموع مساحت ۵۰۴ مترمربع احداث و به غرب ساختمان متصل شده است. از این رو زیربنای کلی ساختمان دانشکده برابر ۴۰۱۶۷ متر مربع است.

همانطور که در شکل (۱) دیده می شود، بخش عمده‌ای از نمای ساختمان از شیشه یا پنجره های شیشه ای تشکیل شده است. همچنین بام ساختمان دارای یک نورگیر به مساحت ۴۴/۸ مترمربع است.

جدول ۱ حاوی مشخصات پوسته ساختمان دانشکده بر حسب مترمربع (م.م) و نیز سهم پنجره از کل پوسته در

جدول ۲- تجهیزات تهویه مطبوع دانشکده

تیپ	واحد	ظرفیت	شناسه	تجهیز
Unicold JAR-100-DS	تن تبرید	۱۰۰	-	چیلر
CHAUFFAGEKAR Turbo 14	کیلووات	۶۰۰	-	بویلر
TAHVIEH TFD-TB-3400	CFM	۲۰۰۰	FC	فن کویل
SARAVEL-MLZ-500	CFM	۵۰۰۰	T1	هواساز
SARAVEL-MLZ-700	CFM	۷۰۰۰	T2	هواساز
SARAVEL-MLZ-1000	CFM	۱۰۰۰۰	T3	هواساز

جدول ۳- مشخصات و تجهیزات مرتبط با زونهای تهویه مطبوع دانشکده

تجهیزات (شناسه*تعداد)	مساحت شیشه (مترمربع)	مساحت دیوار (مترمربع)	حجم (مترمکعب)	مساحت (مترمربع)	نام زون	شماره زون
1*T2	۰	۳۸۴	۱۵۱۲	۲۵۲	آمفی تاتر	۱
10*FC	۵۷۹/۵	۹۶۰	۳۸۴۰	۱۹۲	کریدورها	۲
-	۹۲/۸	۳۲۰	۱۷۴۰	۴۳۵	موتورخانه	۳
1*T2	۹۲/۸	۳۲۰	۱۷۴۰	۴۳۵	آزمایشگاه	۴
1*T3	۲۵۲/۸	۶۴۰	۳۸۴۰	۴۳۵	۲و۱ شمالی	۵
1*T2	۱۲۶/۴	۳۲۰	۱۷۴۰	۴۳۵	همکف شمالی	۶
1*T1	۱۲۶/۴	۳۲۰	۱۷۴۰	۴۳۵	۳ شمالی	۷
1*T3	۲۵۲/۸	۶۴۰	۳۸۴۰	۴۳۵	۲و۱ جنوبی	۸
1*T2	۱۲۶/۶	۳۲۰	۱۷۴۰	۴۳۵	همکف جنوبی	۹
1*T1	۱۲۶/۴	۳۲۰	۱۷۴۰	۴۳۵	۳ جنوبی	۱۰
1*T2	۰	۳۸۴	۱۵۱۲	۲۵۲	کتابخانه	۱۱

می‌کنند. سیستم تهویه مطبوع دانشکده شامل ۱۱ زون است که اطلاعات پایه و تجهیزات مرتبط با هر زون در جدول ۳ ذکر شده است. همانطور که در جدول ۳ دیده می‌شود، ۱۰ دستگاه فن کویل در کریدورها و ۹ دستگاه هوارسان برای سایر زون‌های تهویه مطبوع نصب شده است. شکل (۲) تغییرات سالانه مصرف گاز دانشکده بین سال‌های ۲۰۱۲ (زمستان ۱۳۹۰ تا پاییز ۱۳۹۱) تا ۲۰۱۴ (زمستان ۱۳۹۲ تا پاییز ۱۳۹۳) را بر حسب هزار مترمکعب نرمال^۴ نشان می‌دهد که از قبوض ماهیانه گاز استخراج شده است. تمامی مصرف گاز دانشکده به تهویه مطبوع اختصاص می‌یابد.

شرایط محیطی شامل دمای هوا، وزش باد و تابش خورشید قرار دارد. با توجه به معماری خاص دانشکده، سیستم تهویه مطبوع قوی در دانشکده تعبیه شده تا بتواند گرمایش و سرمایش ساختمان را تامین کند. سیستم تهویه دانشکده شامل ترکیبی از هوارسان و فن کویل است. دو دستگاه بویلر گازسوز به منظور تامین آب گرم و گرمایش در فصل سرد و دو چیلر جذبی شعله مستقیم گازسوز به منظور تامین سرمایش طی تابستان نصب شده است. از این رو، مصرف انرژی دانشکده برای تامین گرمایش و سرمایش بر پایه گاز طبیعی قرار دارد. اجزای اصلی سیستم تهویه دانشکده در جدول ۲ ذکر شده است. چیلرها و بویلرهای با ظرفیت بالا امکان تامین گرمایش و سرمایش دانشکده را فراهم

^۴ kNCM

در این مقاله، کیفیت مدل با دو شاخص MBE و CV(RMSE) مورد سنجش قرار گرفت. محاسبه MBE همانند رابطه (۱) است:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} m_i} \quad (1)$$

که در آن:

Mi: مقادیر اندازه گیری شده،

Si: مقادیر شبیه سازی شده،

Np: تعداد مقادیر در بازه P،

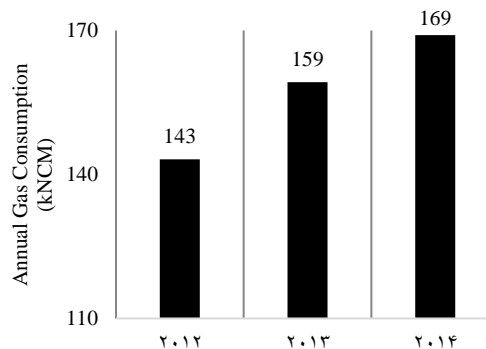
محاسبه CV(RMSE) از رابطه (۲) انجام میشود که در آن \bar{m} متوسط مقادیر اندازه گیری شده است:

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} (m_i - s_i)^2}{N_p}}}{\bar{m}} \quad (2)$$

معیارهای پذیرش عملکرد مدل شبیه سازی انرژی ساختمان بر مبنای راهنمای شماره ۱۴ اشری [۴۶]^۵ و استاندارد بین المللی اندازه گیری و صحت سنجی [۴۷]^۶ همانند جدول ۴ می باشد.

جدول ۴: معیارهای پذیرش صحت مدل انرژی ساختمان

معیار تحلیل ماهانه (درصد)		معیار تحلیل ساعتی (درصد)		استاندارد
MBE	CV(RMSE)	MBE	CV(RMSE)	
۵	۱۵	۱۰	۳۰	ASHRAE
۲۰	-	۵	۱۰	IPMVP

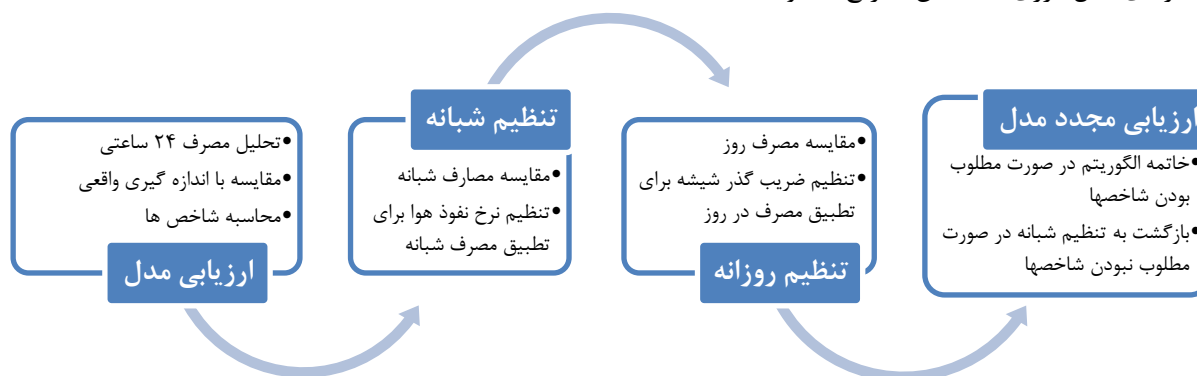


شکل ۲- تغییرات گاز مصرفی سالانه دانشکده

همانطور که در شکل (۲) دیده می شود، مصرف سالانه گاز از ۱۴۳ هزار متر مکعب در سال ۲۰۱۲ به ۱۶۹ هزار متر مکعب در سال ۲۰۱۴ بالغ شده است. با فرض آنکه هر مترمکعب گاز طبیعی معادل ۱۰ کیلو وات ساعت باشد، شاخص مصرف انرژی دانشکده برابر با ۴۰۵ کیلو وات ساعت بر متر مربع در سال است.

۳- تنظیم مدل انرژی ساختمان

مدل سازی انرژی رویکردی بنیادی برای محاسبه انرژی مصرفی ساختمان است. با این حال، نتایج شبیه سازی مصرف انرژی به وسیله نرم افزارها می تواند گاه بسیار متفاوت از اندازه گیری های واقعی باشد [۳۴]. دقت مدل شبیه سازی وابسته به آن است که چه میزان خروجی ها منطبق بر داده های در دسترس باشند. به صورت کلی، تنظیم پارامترهای مدل شبیه سازی انرژی ساختمان گامی مهم در شبیه سازی انرژی ساختمان بوده و مطالعات متعددی در این خصوص انجام شده است [۳۵-۴۵]. در این بخش رویکرد به کار گرفته شده در تنظیم پارامترهای مدل انرژی ساختمان تشریح میشود.



شکل ۴- الگوریتم TNDC

^۶ IPMVP

^۵ ASHRAE

نشان می‌دهد که در آن تمامی زون‌های ساختمان نشان داده شده است. میزان نفوذ هوای محیط در زون‌های مختلف ساختمان برابر $1/2$ لیتر بر مترمربع-ثانیه در نظر گرفته شد. در جدول ۵ مشخصات دیوارهای دانشکده و ضریب انتقال حرارت لحاظ شده برای آن نشان داده شده است. بر مبنای اطلاعات جدول ۵، مقدار ضریب هدایت دیوار (ضریب U) معادل $0/84$ وات بر مترمربع-کلوین در نرم افزار لحاظ شد. میزان نفوذ هوای محیط در زون‌های مختلف ساختمان برابر $1/2$ لیتر بر مترمربع-ثانیه در نظر گرفته شد. در جدول ۵ مشخصات دیوارهای دانشکده و ضریب انتقال حرارت لحاظ شده برای آن نشان داده شده است. بر مبنای اطلاعات جدول ۵، مقدار ضریب هدایت دیوار (ضریب U) معادل $0/84$ وات بر مترمربع-کلوین در نرم افزار لحاظ شد.

جدول ۵: اجزای دیوار دانشکده

ضریب هدایت حرارتی (وات بر متر-کلوین)	حرارت مخصوص (ژول بر کیلوگرم-کلوین)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	
۲۴۰۰	۷۹۰	$1/34$	آجر فشاری، 102 میلی متری
۲۲۴۰	۸۸۰	$1/7$	بتن به ضخامت 200 میلی متر
۹۱	۸۳۷	$0/043$	عایق حرارتی 40 میلی متر
۷۸۵	۸۳۰	$0/16$	گچ $12/5$ میلی متر

به منظور تنظیم مشخصات پوسته از یک الگوریتم ابتکاری به نام (TNDC) همانند شکل (۴) بهره گرفته شد. الگوریتم مذکور به تنظیم مدل انرژی ساختمان صرفاً با تغییر دو پارامتر ضریب نفوذ هوای خارج و نیز ضریب گذردهی شیشه میپردازد. منطق حاکم بر الگوریتم آن است که مصرف انرژی شبانه ساختمان بشدت متأثر از ضریب نفوذ هوای خارج است. طی روز، ضریب گذردهی پنجره‌ها نیز بر مصرف ساختمان اثرگذار است.

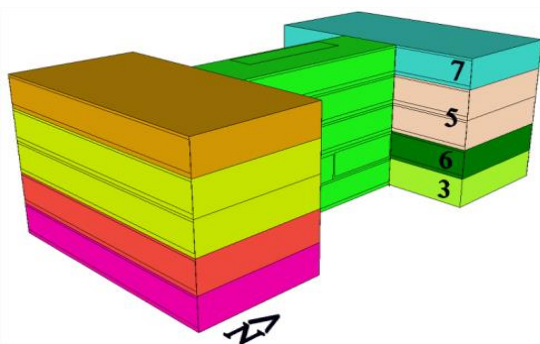
همانطور که در شکل (۴) دیده می‌شود، در این الگوریتم ابتدا مصارف ساعتی شبانه با تنظیم میزان نفوذ هوا تنظیم می‌شود تا شرایط مرتبط با جدول ۴ برای مصارف روزانه تامین شود. در مرحله بعد، مصارف ساعتی روزانه با تنظیم مقدار ضریب گذردهی پنجره‌ها محاسبه شده و ضریب گذردهی پنجره‌ها تنظیم می‌شود تا شرایط مرتبط با جدول ۴ تامین شود.

در انتها نیز صحت سنجی مدل برای تخمین مصارف ماهانه بر مبنای شرایط ذکر شده در جدول ۴ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

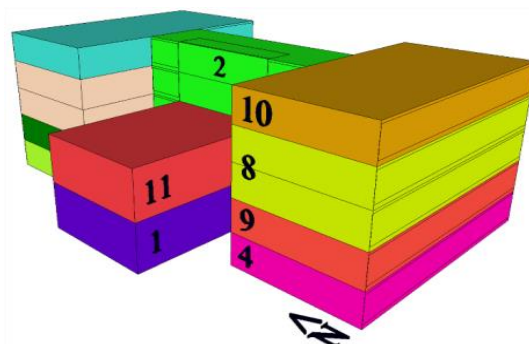
۴- بکارگیری روش و تدوین راهکارهای بهسازی

از نرم افزار انرژی پلاس برای توسعه مدل انرژی دانشکده استفاده شد و تمامی زون‌های تهویه در آن لحاظ شد. شکل های (۵-الف) و (۵-ب) نماهای غربی و شرقی ساختمان دانشکده در محیط انرژی پلاس را نشان می‌دهد. زون‌های تهویه و بلوک‌های شمالی و جنوبی ساختمان نیز در شکل (۵) قابل تشخیص هستند.

شکل (۶) نحوه مدلسازی سیستم تهویه مطبوع دانشکده را

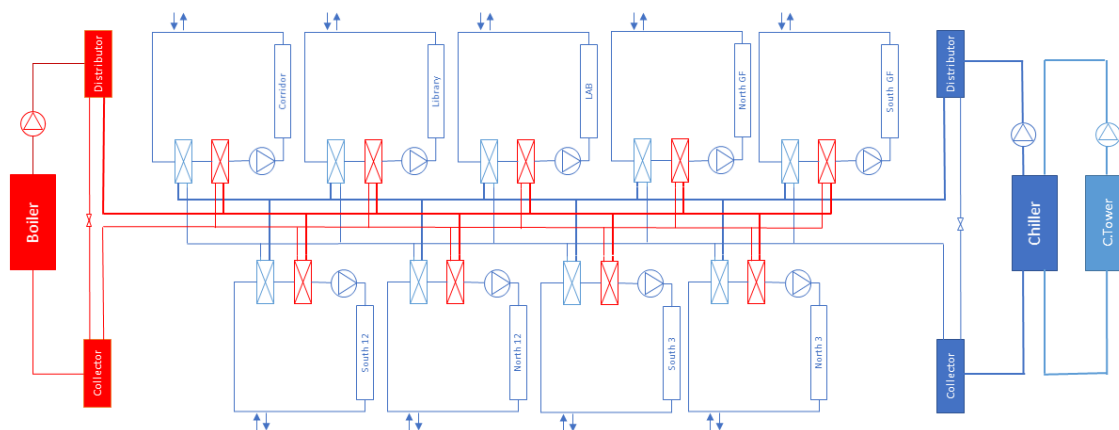


(ب)



(الف)

شکل ۵- نمونه مدلسازی دانشکده در انرژی پلاس بخش غربی (الف) و بخش شرقی (ب)



شکل ۶- مدل سیستم تهویه مطبوع دانشکده در محیط انرژی پلاس

ساعتی مصرف اقدام می کند (شکل ۷).

بر مبنای اطلاعات آب و هوای روزهای اندازه گیری شده [۴۸] و با استفاده از الگوریتم TNDC، ضریب نفوذ هوای ساختمان برابر ۱/۵۶ لیتر بر مترمکعب-ثانیه به دست آمد. همچنین ضریب SHGC برای پنجره های ساختمان و نیز دیواره شیشه ای غربی برابر ۰/۷۷ تعیین شد.



شکل ۷- سامانه خوانش هوشمند گاز

در شکل (۸) میزان مصارف واقعی و مصارف به دست آمده از تنظیم پارامترهای مدل برای دو روز مشخص به همراه مقادیر محاسبه شده برای MBE و CV(RMSE) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (۸) دیده می شود، نتایج بدست آمده از شبیه سازی برای مصرف گاز با مقادیر واقعی در انطباق نزدیکی می باشد. مقدار MBE محاسبه شده برای شبیه سازی مصرف گاز کمتر از ۱۰ درصد و مقدار CV(RMSE) محاسبه شده کمتر از ۳۰ درصد است که نشان دهنده قابل قبول بودن عملکرد مدل برای تخمین مصارف ساعتی

جدول ۶: اجزای بخشهای نورگذر پوسته

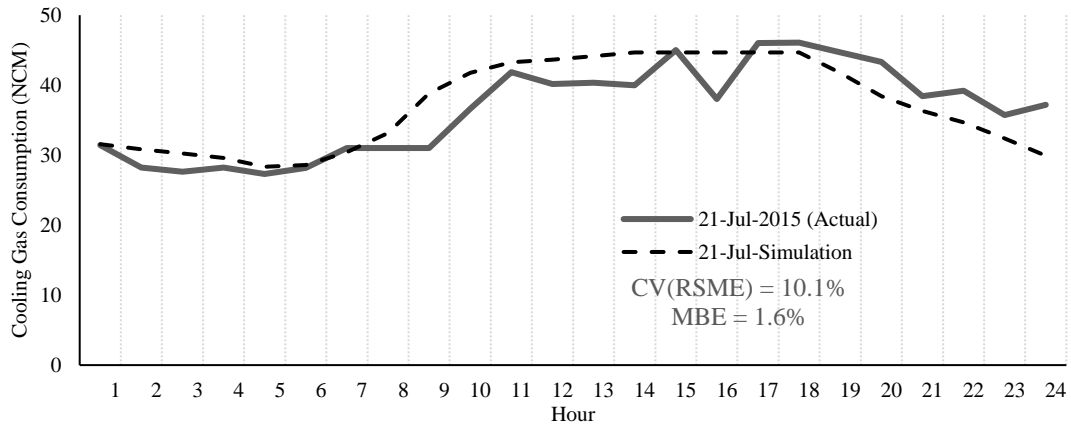
بخش	اجزا	ضریب SHGC	ضریب هدایت (وات بر مترمربع کلون)
پنجره	شیشه ۶ میلیمتر دو جداره با فاصله هوایی ۶ میلیمتری- رنگ خاکستری	۰/۹۹	۳/۰۵
دیوار شیشه غربی	بلوک شیشه شفات	۰/۹۹	۵/۵
نورگیر سقفی		۰/۹۹	۵/۵

همچنین، جدول ۶ مشخصات بخشهای نورگذر پوسته دانشکده و ضرایب لحاظ شده برای پارامترهای آن را نشان می دهد.

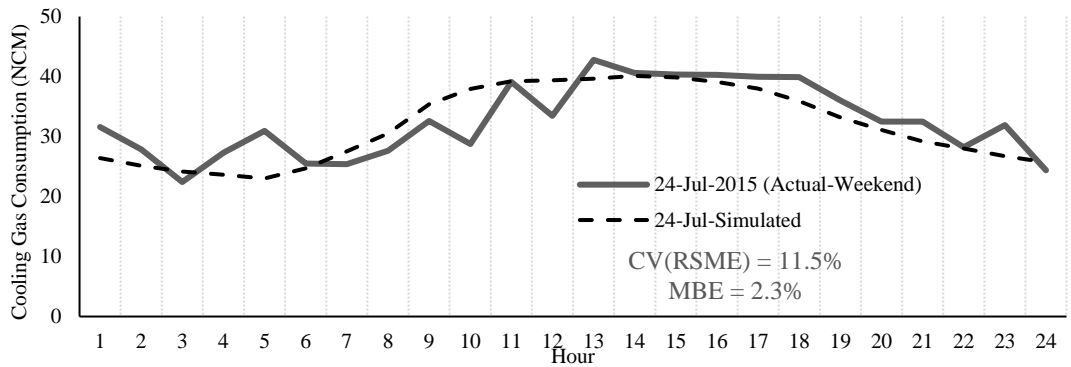
قبل از بکارگیری مدل انرژی دانشکده در بهسازی، لازم است مدل مذکور مورد صحت سنجی قرار گرفته و پارامترهای آن تنظیم شود. از آنجا که میزان مصرف گاز ساعتی از نرم افزار انرژی پلاس قابل استخراج بود، اطلاعات ساعتی مصرف گاز برای صحت سنجی مدل تهویه مورد نیاز بود. بدین منظور و با توجه به پیچیدگی های مرتبط با اندازه گیری جریان گاز از یک طرف و لزوم انطباق اندازه گیری ها با اعداد مندرج در قبوض گاز، نسبت به توسعه سامانه خوانش هوشمند اقدام شد. این سامانه شامل دوربین و پردازنده تصویر بوده که در مقابل شمارشگر کنتور گاز نصب شده و با تحلیل تصویر شمارنده نسبت به ثبت مقادیر

مقادیر شبیه سازی با مقدار متوسط ۵ ساله برای هر ماه همانند شکل (۹) مقایسه شده است.

ساختمان است. در مرحله بعدی، از مدل انرژی برای شبیه سازی مصارف ماهانه گاز طی ۴ ماهه گرم استفاده شد.

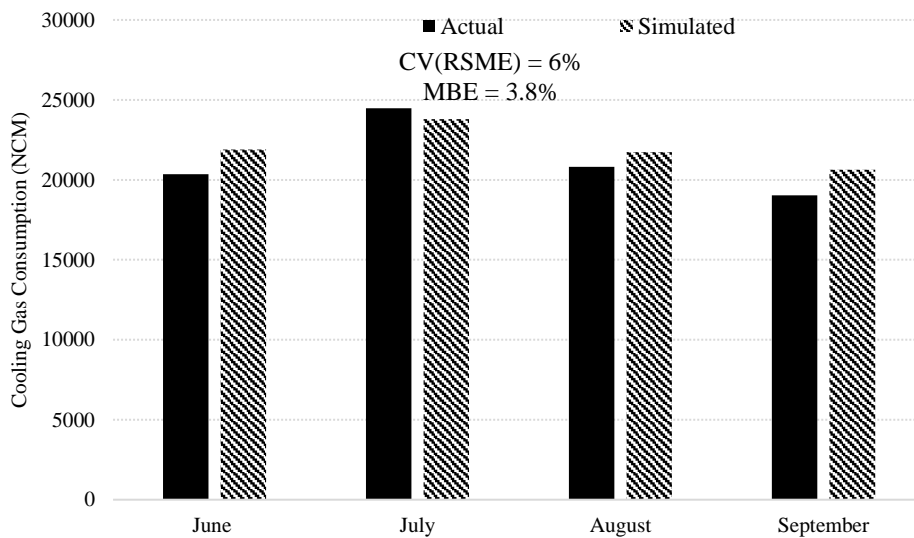


(الف)



(ب)

شکل ۸-مقایسه مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی برای دو روز مختلف



شکل ۹-صحت سنجی ماهانه مدل تنظیم شده

یک انجام گرفت. چالش دیگر آن است که حضور افراد در ساختمان می‌توانست تا ساعاتی پس از ساعات کار رسمی ادامه یابد. از این نظر لازم بود حضور افراد در زون‌های مختلف در برنامه‌ریزی سیستم تهویه مطبوع لحاظ شود.

از این رو برنامه ریزی تجهیزات منتخب در تهویه مطبوع باید به دقت با ساعات کار واقعی پرسنل و دانشجویان هماهنگ می‌شد. مهمترین چالش مرتبط با اقدام یک عبارت از زمان بهینه راه اندازی سیستم‌های تهویه مطبوع در ابتدای روز است. از این جهت که راه اندازی سیستم‌ها در ساعات بسیار زود منجر به تلفات حرارت انرژی در ساختمان شده و از سوی دیگر تاخیر در راه اندازی منجر به از دست رفتن سر شرایط آسایش و اعتراضات پرسنل و دانشجویان می‌شود. به منظور پیاده سازی مناسب اقدام شماره ۱، مطالعه کامل انجام شد تا حضور افراد و نیز رفتار حرارتی ساختمان و تجهیزات تهویه مطبوع مورد شناخت بیشتر واقع شود.

جدول ۷ نشان دهنده زمانبندی پیشنهادی برای تجهیزات منتخب تهویه مطبوع در ساختمان دانشکده است.

جدول ۷- جدول زمانبندی هواسازها

زون	روشن	خاموش
کتابخانه	۸:۰۰	۱۸:۰۰
آزمایشگاه	۷:۰۰	۲۰:۰۰
۱ و ۲ شمالی	۷:۰۰	۲۰:۰۰
همکف شمالی	۶:۰۰	۱۸:۰۰
۳ شمالی	۸:۰۰	۱۸:۰۰
۱ و ۲ جنوبی	۷:۰۰	۱۸:۰۰
همکف جنوبی	۶:۰۰	۱۸:۰۰
۳ جنوبی	۸:۰۰	۱۸:۰۰

اثر بخشی اجرای مجزا یا ترکیبی سه اقدام بهسازی بر مبنای مدل انرژی تنظیم شده مورد سنجش قرار گرفت. نتایج ساعتی در شکل (۱۰) آمده است. همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، انتظار می‌رود بیشترین کاهش مصرف با انجام اقدام ۱ (مدیریت سیستم تهویه مطبوع) حاصل شود. همچنین، افزوده شدن اقدام شماره ۳ (کاهش نفوذ هوا) بر مجموع دو اقدام ۱ و ۲، تأثیری چشمگیر در کاهش مصرف انرژی دارد.

شکل (۱۱) میزان مصرف گاز مصرفی برای سرمایش ساختمان قبل و بعد از بهینه‌سازی ساختمان را بر مبنای مدل تنظیم شده نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۹) دیده می‌شود، مقادیر به دست آمده برای مصارف گاز ماهانه از طریق شبیه‌سازی در انطباق بسیار خوبی با مقادیر واقعی قرار دارد. به طور مشخص مقدار MBE محاسبه شده برابر $\frac{3}{8}$ درصد و مقدار CV(RMSE) به دست آمده برابر ۶ درصد است که نشان دهنده دقت مناسب مدل در محاسبه مصارف ماهانه گاز سرمایشی ساختمان است. بنابراین، هم در تخمین مصارف ساعتی و هم در تخمین مصارف ماهانه الزامات مرتبط با جدول ۴ رعایت شده و مدل تنظیم شده بعنوان مدل واقعی در نظر گرفته شد. با مقایسه مقدار نفوذ هوا و ضریب گذردهی پنجره در مدل تنظیم شده با مقادیر استاندارد برای ساختمان، به طور مشخص مشاهده شد که میزان نفوذ هوا و نیز ضریب گذردهی شیشه‌ها از مقدار مقادیر استاندارد مرتبط بسیار بیشتر است [۴۹-۵۰]. این به این معناست که نفوذ هوا و گذر نور از شیشه‌ها دو عامل اساسی در تقاضای زیاد بار سرمایشی در ساختمان دانشکده است.

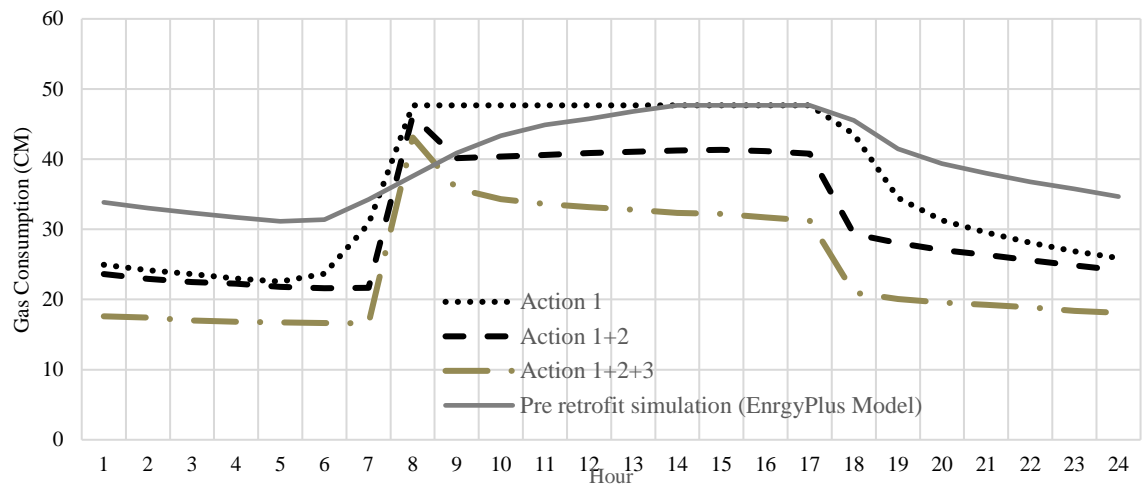
شکل (۸) نشان دهنده مقدار مصرف انرژی در روزهای کاری و غیرکاری هفته است. همانطور که در آن دیده می‌شود الگوی مصرف انرژی در روزهای غیرکاری تفاوت چندانی با روزهای کاری ندارد. همچنین، دیده شد که در روزهای پایانی هفته مقدار مصرف انرژی سرمایشی با روزهای عادی هفته بسیار نزدیک است.

بر این مبنای سه اقدام زیر به منظور اجرا در بهسازی ساختمان دانشکده مدنظر قرار گرفت:

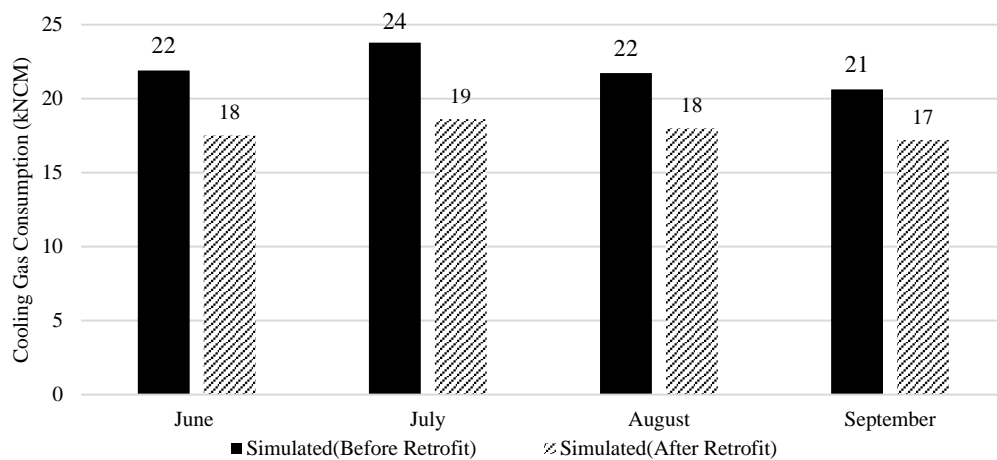
- (۱) مدیریت سیستم تهویه مطبوع
- (۲) کاهش گذردهی پنجره‌ها
- (۳) کاهش نفوذ هوا

از مجموعه اقدامات فوق، اقدامات شماره ۲ و ۳ نیازمند بهسازی پوسته ساختمان و انجام اقدامات فیزیکی در ساختمان در حالی که اقدام شماره ۱ صرفاً متمرکز بر کنترل سیستم تهویه مطبوع است.

در خصوص اقدام شماره ۱، هدف اصلی عبارت است از بکارگیری سیستم تهویه مطبوع صرفاً در زمان‌های مورد نیاز است: شامل ساعات کاری روزهای هفته. با این حال به کارگیری اقدام شماره یک دارای پیچیدگی‌های خاصی هست. یک چالش در بکارگیری اقدام یک آن بود که به دلیل محدودیت ظرفیت چیلر، تمام تجهیزات تهویه مطبوع نمی‌توانستند به صورت همزمان وارد مدار شوند. بنابراین صرفاً بخشی از تجهیزات تحت کنترل در چارچوب اقدام



شکل ۱۰- شبیه سازی تاثیر اقدامات بهسازی بر مصرف ساعتی



شکل ۱۱: شبیه سازی اثر بهسازی بر مصرف گاز تابستانی

زیرزمین شرقی ساختمان را نشان می‌دهد که تفاوت رنگ مشهودی را با بقیه بخش‌های شرقی ایجاد کرده است.



شکل ۱۲- نمونه نصب برچسب شیشه

همچنین دیوار شیشه‌ای بخش غرب با کمک پرده مات همانند شکل (۱۳) پوشانیده شد.

همانطور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود، مدل تنظیم شده نشان می‌دهد مجموعه اقدامات بهسازی منجر به کاهش گاز مصرفی برای سرمایه‌ش ساختمان شده است. بیشترین میزان کاهش برای ماه جولای و برابر با ۲۱ درصد به دست آمده است.

۵- برنامه ریزی و پیاده سازی بهسازی ساختمان

به دلیل محدودیت زمان، تمامی اقدامات مرتبط با بهسازی انرژی به صورت همزمان انجام گرفت.

برای انجام اقدام شماره ۱، زمان‌بندی نشان داده شده در جدول ۷ با نصب تجهیزات کنترلی بر روی هوارسان‌ها پیاده سازی شد. در خصوص اقدام شماره دو، نسبت به نصب برچسب شیشه بر روی ۳۶۰ متر مربع از سطوح پنجره‌های جنوبی ساختمان و نیز زیرزمین بخش شرقی اقدام شد. برچسب‌های مذکور صرفاً اجازه عبور ۲۵٪ از نور خورشید را فراهم می‌کنند. شکل (۱۲) برچسب نصب شده بر روی



(ب)



(الف)

شکل ۱۳- دیوار شیشه ای غربی، الف) قبل از پوشش، ب) بعد از پوشش با پرده مات

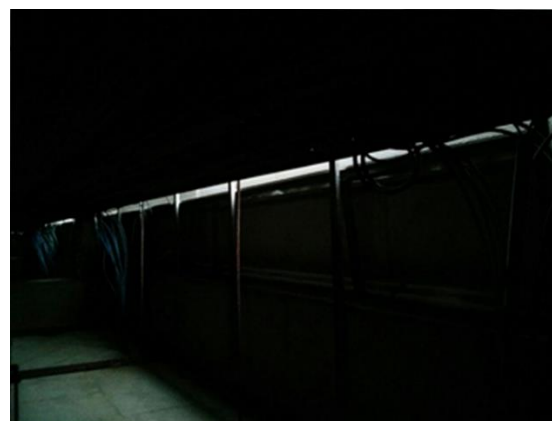
انجام می شد. بدین منظور، قبوض گاز برای ماههای تیر و مرداد و شهریور برای استخراج مصرف سرمایشی طی ۶ سال بعد از انجام بهسازی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، از مدل تنظیم شده انرژی دانشکده برای تعیین خط مبنای مصرف انرژی برای ۶ سال بعد از انجام بهسازی با استفاده از شرایط واقعی آب و هوایی استفاده شد. به منظور ارزیابی دقیقتر مقدار کاهش مصرف، شاخص میزان گاز سرمایشی نسبت به روز درجه سرمایش نیز استخراج شد. روز-درجه سرمایش برای سالهای قبل و بعد از بهسازی بر مبنای ۱۸ درجه از [۳۶] استخراج شد.

در شکل (۱۸) مقدار مصرف گاز تابستانی سرمایش از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۹ به همراه شاخص مصرف بر حسب هزار مترمکعب بازای هر روز درجه نشان داده شده است. با توجه به انجام بهسازی ساختمان در سال ۲۰۱۵، ۲۰ درصد کاهش مصرف در سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ با مصارف محاسبه شده از مدل انرژی دانشکده برای شرایط پیش از بهسازی نیز در شکل نشان داده شده است.

همچنین لازم به ذکر است در سال های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ به کارگیری روش مدیریت سیستم تهویه مطبوع در ساختمان متوقف شد که متناظر با آن مصرف نیز افزایش یافته است. همانطور که در شکل (۱۶) مشاهده میشود:

- با انجام بهسازی ساختمان، میزان مصرف گاز سرمایشی در دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است،
- شاخص شدت مصرف بر حسب روز-درجه سرمایش نیز پس از بهسازی نیز کاهشی بیش از ۲۰ درصد را نشان میدهد و با کاهش پیش بینی شده با مدل تنظیم

در خصوص اقدام شماره ۳، بررسی تفصیلی در بخش های مختلف سقف های کاذب دانشکده به عمل آمد. در نهایت منشاء نفوذ هوای خارج به فضای سقف کاذب دانشکده شناسایی شد که در شکل (۱۴) دیده می شود.



شکل ۱۴: عبور نور از مسیر نفوذ هوای خارج به سقف کاذب

مطابق شکل (۱۴)، راه های هوایی فراوانی بین سقف کاذب و محیط خارجی دانشکده وجود داشته که این مسیرها منجر به ورود هوا به بخش سقف کاذب دانشکده میشود. از سوی دیگر پس از بررسی انجام شده مشخص شد هوای سقف های کاذب دانشکده به هوای داخل مرتبط بوده و این امر موجب نفوذ مستقیم هوای خارج به هوای تحقیق محیط های تهویه شده می شده است. با انجام اقدامات ترمیمی همانند شکل (۱۵) ارتباط هوایی بین سقف کاذب و هوای داخلی ساختمان قطع شد.

۶- ارزیابی نتایج بهسازی

پس از به کارگیری اقدامات بهسازی بر روی ساختمان دانشکده، باید ارزیابی اثربخشی بهسازی ساختمان دانشکده

۲۰۱۸ و ۲۰۱۹، میزان صرفه جویی حدود ۸ درصد کاهش یافته است.

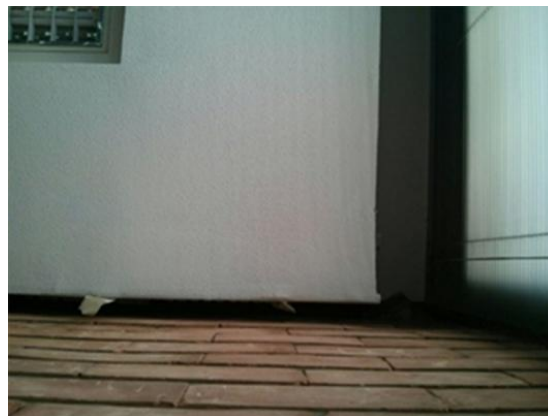
- با این حال، دو اقدام دیگر انجام شده در بهسازی ساختمان باعث شده است همواره ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش مصرف انرژی در ساختمان حاصل شود.

شده انرژی همخوان است. بنا بر این، مدل تنظیم شده انرژی دانشکده بخوبی توانسته است مصرف مبنا را پیش بینی کند. این به معنای تاییدی دیگر در موفقیت الگوریتم پیشنهادی در تنظیم مدل انرژی ساختمان است.

- با توقف مدیریت سیستم تهویه مطبوع در سال‌های

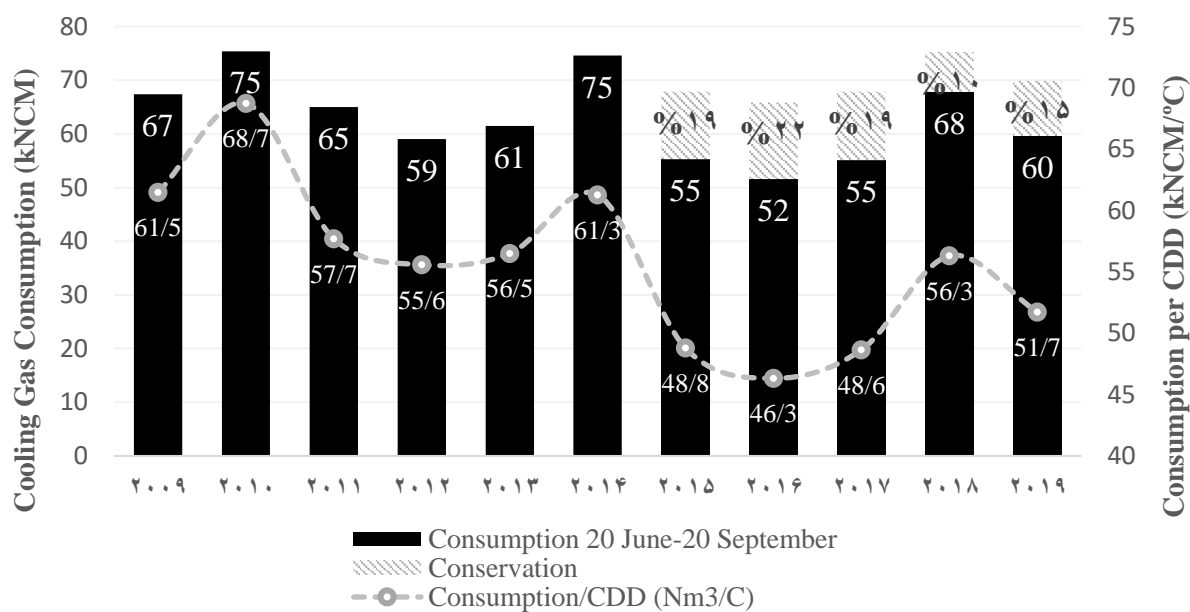


(ب)



(الف)

شکل ۱۵- محل ارتباط هوای داخل با هوای سقف کاذب، (الف) قبل از بهسازی، (ب) پس از بهسازی



شکل ۱۶- تحلیل مصرف گاز سرمایشی پیش و پس از بهسازی

است.

جدول ۸ مقایسه بین کار گزارش شده در مقاله حاضر با چهار پژوهش شاخص اخیر در حوزه بهسازی ساختمان را انجام میدهد.

۷- مقایسه با سایر مراجع

بهسازی ساختمان به منظور کاهش مصرف انرژی از سابقه بیش از ۴ دهه برخوردار است. بخش عمده تلاشها در بهسازی ساختمانها در قالب پروژه های اجرایی بوده که سهم اندکی از آنها بصورت مقالات پژوهشی منتشر شده

ج- در مراجعی که از مدل حرارتی برای بهسازی ساختمان استفاده شده است، تمرکز بسیار کمی بر تنظیم دقیق پارامترها بر مبنای اطلاعات واقعی مصرف صورت گرفته است.

۸- جمع بندی

در این مقاله، رویکردی جدید برای بهسازی ساختمان به منظور کاهش مصرف انرژی ارائه شد. رویکرد مذکور بر توسعه و تنظیم مدل انرژی ساختمان قرار دارد. از مدل تنظیم شده هم برای انتخاب گزینه‌های بهسازی و هم تخمین پتانسیل هر گزینه در کاهش مصرف انرژی ساختمان استفاده شد. الگوریتمی برای تنظیم مدل انرژی بر مبنای دو پارامتر کلیدی پیشنهاد شد. بهسازی دانشکده مهندسی انرژی به کمک روش پیشنهادی، توانایی روش پیشنهادی در پیش‌بینی شرایط پس از بهسازی را نشان داد. همچنین، توانایی الگوریتم پیشنهادی در تنظیم مدل انرژی با ارزیابی عملکرد مدل تنظیم شده در مقابل اطلاعات تاریخی و نیز مصارف پس از بهسازی مشخص شد.

جدول ۸: مقایسه با سایر مراجع

روش تحلیل	درصد کاهش	شماره مرجع
مدل حرارتی	٪۲۱	مقاله حاضر
مدل حرارتی	٪۲۰	[۶]
مدل حرارتی	٪۸.۵	[۵۱]
M&V based line	٪۱۵	[۵۲]
artificial intelligence-based line	٪۱۵.۱	[۵۳]

همانطور که در جدول ۸ دیده میشود، در مقایسه پژوهش حاضر با سایر مراجع بررسی شده:

الف- میزان کاهش مصرف به دست آمده در مقاله حاضر ۲۱٪ برآورد شده است.

ب- اغلب مراجع از رویکردهای ساده در پتانسیل‌سنجی یا تحلیل نتایج بهسازی استفاده کرده‌اند. به طور مشخص، مدل حرارتی تفصیلی تا کنون بصورت بسیار محدود بعنوان ابزاری برای پتانسیل‌سنجی بهسازی ساختمان و نیز صحت‌سنجی نتایج مورد استفاده قرار گرفته است.

مراجع

- [1] Huang. Y. and J Niu. "Optimal Building Envelope Design Based On Simulated Performance: History, Current Status and New Potentials". Energy and Buildings 117. (2016): 387-398.
- [2] Jazaeri. J. R.L Gordon. and T Alpcan. "Influence of Building Envelopes, Climates, and Occupancy Patterns On Residential HVAC Demand". Journal of Building Engineering 22. (2019): 33-47.
- [3] Kossecka. E. and J Kosny. "Influence Of Insulation Configuration On Heating And Cooling Loads In A Continuously Used Building". Energy and Buildings 34.(2002): 321-331.
- [4] Fernandez. N. S Katipamula. W Wang. Y Huang. and G Liu. "Energy Savings Modelling Of Re-Tuning Energy Conservation Measures In Large Office Buildings". Journal of Building Performance Simulation 8. (2015): 391-407.
- [5] Balaji. N.C. M Mani. and B. V Venkatarama Reddy. "Dynamic Thermal Performance Of Conventional And Alternative Building Wall Envelopes". Journal of Building Engineering 21. (2019): 373-395.
- [6] Bianco. T Iovane. and G Mauro "A responsive double-skin façade for the retrofit of existing buildings: Analysis on an office building in a Mediterranean climate ". Journal of Energy and Buildings 284. (2023).
- [۷] ذوالفقاری، سیدعلیرضا، مهران سعادت‌نوبخت، و الهه نوروزی جاجرم. "بررسی تأثیر استفاده از نماهای دوپوسته سبز بر مصرف انرژی ساختمانهای بلند مرتبه در شرایط اقلیمی تهران". نشریه مدل‌سازی در مهندسی ۱۷، ۵۶ (۱۳۹۸): ۵۱-۶۱.
- [8] Papadopoulos. S. E Azar. W.L Woon. and C.E Kontokosta. "Evaluation of Tree-Based Ensemble Learning Algorithms for Building Energy Performance Estimation", Journal of Building Performance Simulation 11. (2018): 322-332.
- [9] Ng. L.C. A.K Persily. and S.J Emmerich. "Improving Infiltration Modeling In Commercial Building Energy Models". Energy and Buildings 88. (2015): 316-323.
- [10] Erfani. A. A Rajabi-Ghahnaviyeh. and M. Boroushaki. "Design and Construction of a Non-Linear Model Predictive Controller for Building's Cooling System". Building and Environment. 133. (2018): 237-245.
- [11] Liu. Y. L Yang. W Zheng. T Liu. X Zhang. and J Liu. "A Novel Building Energy Efficiency Evaluation

Index: Establishment Of Calculation Model And Application". Energy Conversion and Management 166. (2018): 522–533.

[۱۲] امیریون، محمدحسین . و میلاد علایی. "برنامه ریزی بهینه مصارف خانگی با استفاده از یک مدل پاسخگویی بار و با در نظر گرفتن رفاه ساکنین". نشریه مدل سازی در مهندسی ۷۲، ۲۱، (۱۴۰۲): ۶۹–۸۲.

[13] Mostafazadeh. F. S Jalilzadeh Eirdmousa. and M Tavakolan. "Energy, economic and comfort optimization of building retrofits considering climate change: A simulation-based NSGA-III approach" Journal of Energy and Buildings 280. (2023).

[14] Crawley. D.B. L.K Lawrie. F.C Winkelmann. W.F Buhl. Y.J Huang. C.O Pedersen. R.K Strand. R.J Liesen. D.E Fisher. M.J Witte. and J Glazer. "EnergyPlus: Creating A New-Generation Building Energy Simulation Program", Energy and Buildings 33.(2001): 319–331.

[15] Bastos Porsani. G. C. Fernández Bandera. "A Case Study of Empirical Validation of EnergyPlus Infiltration Models Based on Different Wind Data". Buildings 2023, 13, 511.

[16] Sang. Y. J.R Zhao. J Sun. B Chen. and S Liu. "Experimental Investigation And Energyplus-Based Model Prediction Of Thermal Behavior Of Building Containing Phase Change Material". Journal of Building Engineering 12 .(2017): 259–266.

[17] O'Neill. Z. X Pang. M Shashanka. P Haves. and T Bailey. "Model-Based Real-Time Whole Building Energy Performance Monitoring and Diagnostics". Journal of Building Performance Simulation 7. (2014): 83–99.

[18] Boyano. A. P Hernandez. and O Wolf. "Energy Demands and Potential Savings in European Office Buildings: Case Studies Based On Energyplus Simulations". Energy and Buildings 65. (2013): 19–28.

[19] Pan. Y. R Yin. and Z Huang. "Energy Modeling of Two Office Buildings With Data Center For Green Building Design". Energy and Buildings 40. (2008): 1145–1152.

[20] Eguaras-Martínez. M. M Vidaurre-Arbizu. and C Martín-Gómez. "Simulation and Evaluation Of Building Information Modeling In A Real Pilot Site". Applied Energy 114. (2014): 475–484.

[21] El-Darwish. I. and M Gomaa. "Retrofitting Strategy For Building Envelopes To Achieve Energy Efficiency", Alexandria Engineering Journal 56. (2017): 579–589.

[22] Chen. X. K Qu. J Calautit. A Ekambaram. W Lu. C Fox. G Gan. and S Riffat. "Multi-Criteria Assessment Approach for a Residential Building Retrofit in Norway". Energy and Buildings 215. (2019).

[23] Mac Uidhir. T. F Rogan. M Collins. J Curtis. and B.P.Ó Gallachóir. "Improving Energy Savings From A Residential Retrofit Policy: A New Model To Inform Better Retrofit Decisions". Energy and Buildings 209. (2020).

[۲۴] رهگذر، سعید ، مازیار دهقان، ابوالفضل پوررجبیان، و حمیدرضا حقیگو. "ارزیابی فنی-اقتصادی بهره‌گیری از سامانه ذخیره‌سازی یخ بر اساس الزامات جدید پیش‌نویس ویرایش چهارم مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان". نشریه مدل‌سازی در مهندسی ۱۸، ۶۳ (۱۳۹۹): ۶۵–۷۲.

[۲۵] ذوالفقاری، سیدعلیرضا، مهران سعادت‌ی نسب، و الهه نوروزی جاجرم. "بررسی تأثیر استفاده از نماهای دوپوسته سبز بر مصرف انرژی ساختمانهای بلند مرتبه در شرایط اقلیمی تهران". نشریه مدل‌سازی در مهندسی ۱۷، ۵۶ (۱۳۹۸): ۵۱–۶۱.

[۲۶] علیزاده، محمد، میثم جعفری نوکندی، و یامین سلطان مرادی. "حمدلسازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره‌ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخ‌گویی بار". نشریه مدل‌سازی در مهندسی ۱۷، ۵۷ (۱۳۹۸): ۲۱۵–۲۲۶.

[27] Fadzli Haniff. M. H Selamat. R Yusof. S Buyamin. and F Sham Ismail. "Review Of HVAC Scheduling Techniques For Buildings Towards Energy-Efficient And Cost-Effective Operations". Renewable and Sustainable Energy Reviews 27. (2013): 94–103.

[28] Huang. W.Z. M Zaheeruddin. S.H Cho. "Dynamic Simulation Of Energy Management Control Functions For HVAC Systems In Buildings". Energy Conversion and Management 47. (2006): 926–943.

[29] Kaiser. M.J. and A.G Pulsipher. "Preliminary Assessment Of The Louisiana Home Energy Rebate Offer Program Using IPMVP Guidelines". Applied Energy 87. (2010): 691–702.

[30] Waltz. J.P. "Measuring and Verifying Your Energy Performance Contracts: What are Your Options? How do You Choose?". Strategic Planning for Energy and the Environment 21. (2002): 47–64.

- [31] Ginestet, S. D Marchio. and O Morisot. "Improvement Of Buildings Energy Efficiency: Comparison, Operability And Results Of Commissioning Tools", *Energy Conversion and Management* 76. (2013): 368–376.
- [32] Shin. H. et al. "Calibration of building energy simulation model for a mechanically ventilated livestock facility". *Biosystems Engineering* 217. (2022): 115–130.
- [33] González. V.G., Bandera, C.F. "A building energy models calibration methodology based on inverse modelling approach". *Building Simulation* 15. (2022):1883–1898.
- [34] Ahmad. M. C.H Culp. "Uncalibrated building energy simulation modeling results". *HVAC&R Research* 12. (2006): 1141–1155.
- [35] Yang. Z. and B Becerik-Gerber. "A Model Calibration Framework for Simultaneous Multi-Level Building Energy Simulation". *Applied Energy* 149. (2015): 415–431.
- [36] Raftery. P. M Keane. and A Costa. "Calibrating Whole Building Energy Models: Detailed Case Study Using Hourly Measured Data". *Energy and Buildings* 43. (2011): 3666–3679.
- [37] Mustafaraj. G. D Marini. A Costa. and M Keane."Model Calibration for Building Energy Efficiency Simulation". *Applied Energy* 130. (2014): 72–85.
- [38] Kim. Y.-S. M Heidarinejad. M Dahlhausen. and J Srebric."Building Energy Model Calibration with Schedules Derived From Electricity Use Data". *Applied Energy* 190. (2017): 997–1007.
- [39] Coakley. D. P Raftery. and M Keane. "A Review Of Methods To Match Building Energy Simulation Models To Measured Data" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37. (2014): 123–141.
- [40] Shapiro. I. "Energy Audits In Large Commercial Office Buildings" *ASHRAE Journal* 51. (2009).
- [41] Waltz. J.P. "Practical Experience In Achieving High Levels Of Accuracy In Energy Simulations Of Existing Buildings". *ASHRAE Transactions*. (1992): 606–617.
- [42] Clarke. J.A. P.A Strachan. and C Pernot. "Approach To The Calibration Of Building Energy Simulation Models". *ASHRAE Transactions*. (1993): pp. 917–927.
- [43] Haberl. J.S.and T.E Bou-Saada. "Procedures For Calibrating Hourly Simulation Models To Measured Building Energy And Environmental Data". *Journal of Solar Energy Engineering. Transactions. ASME* 120. (1998): 193–204.
- [44] Bertagnolio. S. "Evidence-Based Model Calibration for Efficient Building Energy Services". Ph.D. Dissertation, Université de Liège, Belgium. (2012).
- [45] Thomas A. Lunneberg. "Improving Simulation Accuracy Through The Use Of Short-Term Electrical End-Use Monitoring". *IBPSA Conf. Kyoto*. (1999): 13-15.
- [46] A. ASHRAE, Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings, Am. Soc. Heating, Refrig. Air- Conditioning (2002).
- [47] EVO. International Performance Measurement & Verification Protocol. Efficiency Valuation Organisation; 2007., (n.d.).
- [48] I.R.OF IRAN Meteorological Organization :, (n.d.). <http://www.irimo.ir/eng/index.php>.
- [49] Standard 189.1 -A Comprehensive Solution for High-Performance Buildings, (n.d.). <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-189-1> (April 10, 2020).
- [50] International Green Construction Code (IgCC) - ICC, n.d. <https://www.iccsafe.org/products-and-services/i-codes/2018-i-codes/igcc/>.
- [51] Oree, V., Khoodaruth, A. & Teemul, H. "A case study for the evaluation of realistic energy retrofit strategies for public office buildings in the Southern Hemisphere". *Building Simulation* . 9, 113–125 (2016).
- [52] M. Abounaga, M. Moustafa. "Retrofitting approach to improve energy performance and mitigate CO2 emissions in hot climates". *Renewable Energy and Environmental Sustainability*. 1, 28 (2016)
- [53] L.A. López-Pérez, J. Flores-Prieto "Adaptive thermal comfort approach to save energy in tropical climate educational building by artificial intelligence" *Energy* 263. (2023): 125706