

Control of Indoor Environmental Conditions Based on the Model and Use of Predictive Control Method

Amirreza Alizadeh¹, *M.Sc.*, Seyed Mohamad Kargar^{1,2}, *Assistant Professor*

¹ Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

² Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
amiralizadeh975@yahoo.com
kargar@pel.iaun.ac.ir

Abstract

In this paper, a model predictive control approach is presented to regulate indoor temperature. In recent years, the highest energy consumption in buildings is related to heating, ventilation, and air conditioning systems. Therefore, the control of heating, ventilation, and air conditioning systems in buildings has been taken into consideration to reduce energy consumption. At first, a construction model is designed in the Energy-plus software, then all input and output data is collected from this software to identify the state-space model. Then the Model-based predictive control algorithm is applied to control the indoor building temperature. The contribution of this paper is two-fold. Firstly, the data used in the system identification section is based on the assumption that the rooms are not isolated. There is a temperature relationship between the rooms, which provides a more realistic model of the system. Secondly, the external ambient temperature is considered as a disturbance, and its effect on controller design has been investigated. The simulation results for 24 hours show the good performance of the model predictive control approach over the optimal control method along with reducing energy consumption while maintaining the optimal temperature conditions.

Key words: heating, ventilating and air conditioning, system identification, model predictive control

Received: 12 May 2020

Revised: 21 July 2020

Accepted: 5 September 2020

Corresponding Author: Dr. Seyed Mohamad Kargar

Citation: A. Alizadeh, S.M. Kargar, "Control of indoor environmental conditions based on the model and use of predictive control method", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 44, pp. 21-35, Winter 2021 (in Persian).

کنترل شرایط محیطی داخل ساختمان بر مبنای مدل و استفاده از روش کنترل پیش‌بین

امیررضا علی‌زاده^۱، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، سید محمد کارگر^{۱،۲}، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

amiralizadeh975@yahoo.com

kargar@pel.iaun.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک روش کنترلی با رویکرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل به منظور تنظیم دمای داخل ساختمان ارائه می‌گردد. در سال‌های اخیر بیشترین میزان مصرف انرژی در ساختمان‌ها، مربوط به سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع بوده است. از همین رو کنترل سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع در ساختمان‌ها در راستای کاهش مصرف انرژی مورد توجه قرار گرفته است. در ابتدا یک مدل ساختمانی در نرم‌افزار انرژی پلاس طراحی و سپس تمام داده‌های ورودی و خروجی، جهت شناسایی از این نرم‌افزار استخراج می‌شوند. در ادامه شناسایی سیستم به روش مدل فضای حالت انجام می‌گیرد. سپس کنترل‌کننده با رویکرد پیش‌بین جهت کنترل دمای داخلی ساختمان طراحی می‌گردد. نوآوری این مقاله در دو زمینه قابل بیان است، اول اینکه برخلاف اکثر پژوهش‌های صورت گرفته، داده‌های استفاده شده در قسمت شناسایی سیستم با فرض ایزوله نبودن اتاق‌ها و وجود ارتباط دمایی بین اتاق‌ها انجام شده است که باعث تولید مدلی دقیق‌تر از سیستم می‌گردد. دوماً در این پژوهش اثر دمای خارجی محیط به عنوان اغتشاش در نظر گرفته شده است و تأثیر آن در طراحی کنترل‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در افق یک ساعته، عملکرد خوب کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مبتنی بر مدل نسبت به روش کنترل بهینه به همراه کاهش مصرف انرژی در کنار حفظ شرایط مطلوب دمایی برای ساکنین در یک ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، شناسایی سیستم، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۲/۲۳

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۴/۳۱

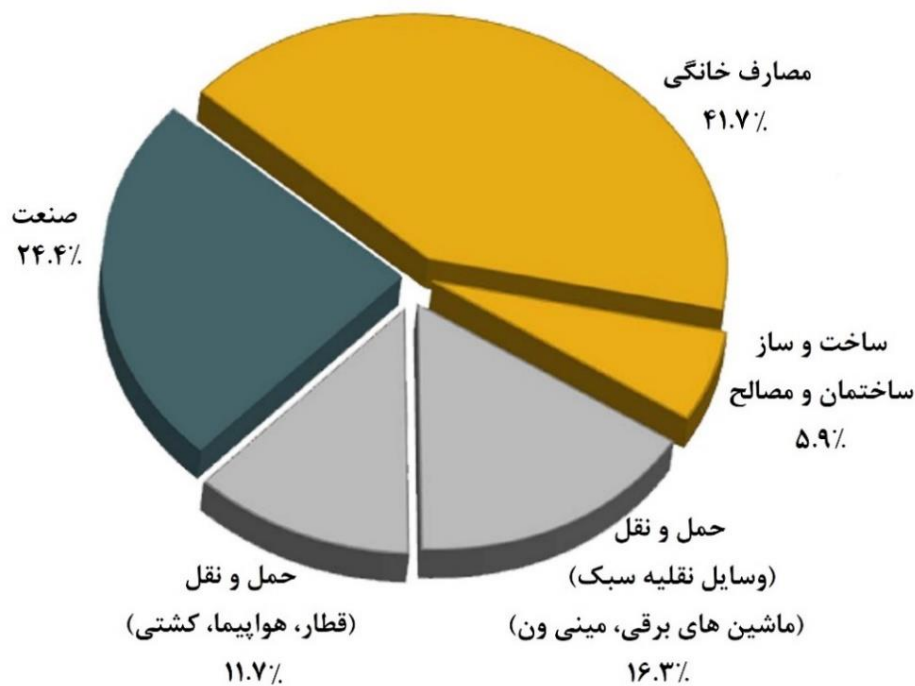
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۶/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید محمد کارگر

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

امروزه با افزایش مصرف انرژی در جهان و پیامدهای زیاد آن، بسیاری از فعالیت‌های علمی در دنیا بر پایه‌ی بهینه‌سازی مصرف انرژی و همچنین کنترل سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع^۱ و استفاده از سیستم‌های تجدیدپذیر معطوف می‌شود [۱، ۲]. با توجه به این‌که با افزایش جمعیت جهان منابع سوخت‌های فسیلی در حال نابودی است، در نتیجه تقاضا برای مصرف برق نسبت به گذشته در حال افزایش است. از این‌رو مصرف انرژی به یکی از مهم‌ترین مشکلات جدی برای آیندگان در دنیا تبدیل شده است. طبق شکل (۱) در سال ۲۰۱۳ در کشور ایالات متحده آمریکا بیشترین میزان مصرف انرژی با ۴۱/۷ درصد به‌خاطر مصرف ساختمانی بوده است. به‌همین منظور افزایش آسایش حرارتی و همچنین کاهش مصرف انرژی به نیازی جدی در دنیا تبدیل شده است.



شکل (۱): میزان مصرف انرژی در سال ۲۰۱۳ در کشور آمریکا [۲].

Figure (1): Energy consumption in the USA in 2013

در همین راستا اخیراً بیشترین پیشنهادات در راستای کنترل سیستم‌های گرم‌کننده، تهویه‌کننده و تهویه مطبوع جهت کنترل، بهینه‌سازی مصرف انرژی و حفظ آسایش حرارتی بوده است. زیرا تحقیقات اخیر نشان داده است که سیستم‌های کنترل شرایط محیطی مطبوع در ساختمان‌ها، منبع اصلی مصرف انرژی در ساختمان‌ها هستند و حدود ۵۰ درصد انرژی مصرف‌شده را به خود اختصاص داده‌اند. از این‌رو این سیستم‌ها در طبقه‌بندی سیستم‌های مدیریت انرژی^۲ نیز قرار می‌گیرند [۴]. امروزه سیستم‌های تهویه مطبوع از مهم‌ترین، تاثیرگذارترین و پرمصرف‌ترین تأسیسات تمام ساختمان‌های مسکونی، تجاری، صنعتی و اماکن عمومی به‌شمار می‌آیند. هدف این سیستم‌ها ایجاد محیطی راحت از نظر دما، رطوبت و سایر پارامترهای محیطی برای ساکنین آن است. با توجه به اهمیت عملکرد این سیستم‌ها، مسأله‌ی کنترل سیستم‌های تهویه مطبوع امروزه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین جنبه‌های کاربرد مهندسی کنترل مطرح شده است. بهبود شرایط آسایش ساکنین و صرفه‌جویی انرژی دو هدف کلان در طراحی سیستم‌های کنترل تهویه مطبوع به‌شمار می‌روند و عمده تلاش طراحان در جهت ارائه‌ی روش‌ها و راهبردهای کنترلی برای رسیدن به این دو هدف است. به‌طور کلی تحقیق و بررسی‌های متعددی بر روی این موضوع در دنیا انجام شده و دارای روش‌های گوناگونی بوده‌اند که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره خواهد شد. در مقالات قدیمی‌تر در سال ۲۰۰۹ در دانشگاهی در کشور یونان، پژوهشی بر پایه‌ی کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مبتنی بر مدل^۳ همراه با مدیریت مصرف انرژی ساختمان‌ها ارائه شد. در مجموع سیستم مورد نظر هوای محیط داخل ساختمان را برای رسیدن به نقاط تعیین‌شده برای تنظیم دمای محیط داخلی ساختمان و

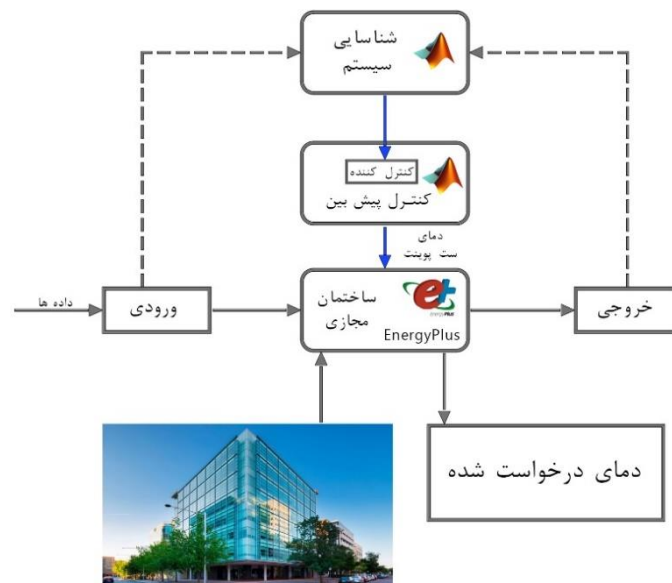
همچنین به حداقل رساندن میزان هزینه‌های انرژی، پیش‌بینی می‌کرد. پس از انجام این آزمایش نمودارها نشان دادند که تعداد زیادی از دانشجویان از شرایط محیطی ساختمان راضی بودند [۵]. علاوه بر این طبق پژوهش‌های در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ آقای جوئی کین به همراه همکارانش بر روی تاثیرات مدل کنترل پیش‌بین بر کاهش مصرف انرژی و همچنین کاهش هزینه برای ساختمان‌ها تحقیقاتی به عمل آوردند [۶، ۷]. در این پروژه از سیستم تهویه حجم متغیر^۴ یا برای خنک‌سازی طبقه اول یک ساختمان با چند واحد استفاده شد. لازم به ذکر است که برای طراحی و شبیه‌سازی این ساختمان از نرم‌افزار انرژی پلاس^۵ استفاده شد. در مرحله‌ی بعد برای شناسایی سیستم مورد نظر، دمای واحدها و توان تهویه مطبوع به‌عنوان داده‌های شناسایی سیستم انتخاب شدند که در نتیجه مدل ریاضی به‌دست آمده به‌عنوان مدل کنترل پیش‌بین انتخاب شد. در این پروسه از مدل شناسایی مدل خودمختار^۶ برای ساخت مدل دینامیکی سیستم استفاده شد. در نتیجه‌ی این پژوهش، مشاهده شد که استراتژی مدل کنترل پیش‌بین توانسته است بیشترین ذخیره را در مصرف انرژی و هزینه نسبت به سایر استراتژی‌ها داشته باشد. در پژوهش [۸]، یکی دیگر از راه‌کارهای شناسایی سیستم برای کنترل دمای ساختمان رونمایی شد. در این پژوهش در ابتدا محیط دانشگاهی دو طبقه در کشور فرانسه در نرم‌افزار انرژی پلاس طراحی و سپس آب و هوای مربوط به آن منطقه برای آن ساختمان لحاظ گردید. در مرحله‌ی دوم، داده‌های ورودی و خروجی از این نرم‌افزار استخراج شد تا در مرحله‌ی بعدی برای شناسایی سیستم از آن استفاده شود. مدل دینامیکی سیستم مورد نظر از مدل شناسایی جعبه سیاه^۷ به‌دست آمد. در کل این پژوهش نشان داد که این مدل شناسایی برای یک اتاق و یا کل ساختمان به‌خوبی قابل اجرا خواهد بود، زیرا میزان تطابق ورودی و خروجی‌ها با درصد بالایی در مدل دینامیکی به‌دست‌آمده مشاهده شد. اما نکته‌ی حائز اهمیت در این پژوهش این است که داده‌ها در شرایطی مورد شناسایی قرار گرفتند که هیچ‌گونه ارتباط دمایی بین اتاق‌ها در این پژوهش در نظر گرفته نشد و همه‌ی اتاق‌ها کاملاً ایزوله در نظر گرفته شده است. به این معنا که داده‌های تک‌تک اتاق‌ها جدا بوده و هیچ‌گونه وابستگی دمایی بین اتاق‌ها وجود ندارد [۹]. در یک مطالعه مروری در مورد نظارت بر کنترل بهبود انعطاف‌پذیری انرژی^۸ تأمین‌شده توسط پمپ‌های حرارتی در ساختمان‌ها انجام شده است. تفکیک بین کنترل‌های مبتنی بر قانون^۹ و کنترل‌های پیش‌بینی مدل با توجه به تفاوت‌های واضح و آشکار در مفهوم و پیچیدگی این دو انجام شده است. برای هر دوی آن‌ها، تحقق اهدافی که استراتژی‌ها ادعا می‌کنند، ورودی‌های کنترل و همچنین محدودیت‌ها و اختلالات بررسی شده است. به‌طور قابل توجه در اهداف اقتصادی (کاهش هزینه‌های انرژی) بیشترین قسمت تحقیقات را به‌خود اختصاص داده است، بنابراین نویسندگان مایل هستند که سایر اهداف مرتبط با انعطاف‌پذیری انرژی را بیشتر مورد مطالعه و بررسی قرار دهند. گذشته از خود استراتژی‌های کنترل، گزینه‌های مختلف ذخیره‌سازی حرارت (که برای فعال‌سازی انعطاف‌پذیری لازم است) نیز بررسی شده‌اند که بر اساس مطالعات به نظر می‌رسد در این زمینه، جرم حرارتی درونی مقرون به صرفه‌تر از مخازن بافر آب باشد. بر اساس نتیجه‌گیری‌های حاصل، پیشنهاداتی به‌عنوان موضوعات تحقیقات آتی ارائه شده است. مضاف بر این در مقاله [۱۰]، این مطالعه ابتدا فاکتورهای عملی تأثیرگذار بر روی راه‌اندازی مدل را شناسایی می‌کند. هفت فاکتور که شامل روش طراحی ساختمان، ساختار مدل، مرتبه‌ی مدل، مجموعه‌ی داده، کیفیت داده، الگوریتم شناسایی و مقادیر اولیه پارامترها هستند. بنابراین از طریق تعداد زیادی از آزمایش‌ها تأثیر هر فاکتور بر روی دقت تمرکز مدل‌های جعبه خاکستری^{۱۰} برای یک ساختمان تک اتاقه تحلیل شده است. نهایتاً این مطالعه یک زیرمجموعه از مدل‌های شناسایی شده با این فاکتورها را در عملکرد گرمایشی، تهویه‌ای و تهویه کنترل‌کننده‌های پیش‌بین را پیاده‌سازی می‌کند و آن‌ها را در شبیه‌سازی از یک مورد بیان شده آزمایش می‌کند که هدف آن بهینه‌کردن سیستم تهویه ساختمان از لحاظ هزینه‌های الکتریسیته متغیر با زمان است. در این مرجع نشان داده شده که از لحاظ هزینه‌ی تهویه، تفاوتی بالای ۲۰ درصد بین بدترین و بهترین حالت از لحاظ عملکرد مدل اجرایی وجود دارد. علاوه بر این طبق پژوهش [۱۱]، در سال‌های اخیر آقای ریزوف^{۱۱} در مورد پیش‌بینی و کنترل دما برای ساکنان و همچنین بازسازی خانه‌های قدیمی جهت فراهم کردن آسایش حرارتی برای ساکنان پژوهشی ارائه کردند. برای انجام این پروسه ۲ نکته مورد نظر قرار گرفت. اول، ساختمانی جدید که دارای سیستم تهویه گرمایش مطبوع است و دوم، ساختمانی با بافت قدیمی و بدون سیستم تهویه مطبوع مورد بحث قرار گرفتند. لازم به ذکر است که مدل این مرجع شامل تأثیرهای فیزیکی متنوع از قبیل نفوذ هوا، گرمایش داخلی (دیوارهای داخلی، کف ساختمان، سقف و مبلمان)، تأثیر حضور انسان به‌عنوان منابع گرما و همچنین در نظر گرفتن درصد کربن‌دی‌اکسید است. در نتیجه مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده‌ی

پیش‌بین به راحتی امکان کنترل دما، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و هزینه را در ساختمان‌های قدیمی و جدید برای ساکنان به‌طور کاملاً رضایت‌بخش فراهم می‌کند. اما در مقالات به‌روزتر در سال ۲۰۲۰ در باب بهینه‌سازی مصرف انرژی، مطالب دیگری مورد توجه نویسندگان قرار گرفت. کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل از سال ۲۰۰۰ تا کنون به‌عنوان یک روش صرفه‌جویی مبتنی بر نرم‌افزار در میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها تبلیغ شده است. با این وجود با استفاده از روش‌های موجود، خیلی مورد پذیرش بخش صنعت قرار نگرفته است. این مقاله رویکردی جدید را پیشنهاد و بررسی می‌کند که با استفاده از الگوریتم استخراج قوانین^{۱۲} می‌توان آن را به‌سادگی در کنترل‌کننده‌های ساختمانی پیاده‌سازی نمود و بر کنترل غیربهینه و کم‌کیفیت فعلی غلبه کرد. برنامه‌نویسان کنترل ساختمان می‌توانند درخت تصمیم‌گیری^{۱۳} حاصل را پیاده‌سازی کنند تا هنگام پیش‌بینی شرایط محیطی به‌منظور برقراری الزامات گرمایی فضاها، در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود. یک الگوریتم دقیق کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل با استفاده از مدل‌های معکوس در ۲۷ اتاق یک ساختمان سازمانی اعمال شده است تا داده‌های لازم برای یک رویکرد یادگیری طبقه‌بندی ایجاد شود. درخت‌های تصمیم‌گیری فصل گرمایش و سرمایش بر اساس ورودی‌ها و خروجی‌های این الگوریتم دقیق کنترل پیش‌بین حاصل شده‌اند. یک تصادفی‌سازی دسته‌جمعی و نمونه انجام شده است تا درختان به تمام اتاق‌ها تعمیم داده شود و در چند اتاق خاص به‌صورت بیش از حد قرار نگیرند. ذخیره‌سازی انرژی با استفاده از الگوریتم استخراج قوانین و کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل فصل سرمایش به‌ترتیب ۲۷ و ۴۲ درصد بوده است، در حالی که ذخیره‌سازی انرژی برای فصل گرمایش به ترتیب ۳۳ و ۱۸ درصد بوده است. هر دو الگوریتم در مقایسه با کنترل‌های راکتور، فاصله‌ی بین نقطه‌ی تنظیم دما و دمای هوای بیرونی اندازه‌گیری‌شده را کاهش می‌دهند [۱۲]. همچنین در پژوهشی در کشور چین انجام شد که در آن، در مواجهه با محیط‌های شلوغ شهری، اقدامات فعلی در زمینه‌ی صرفه‌جویی در مصرف انرژی روی طراحی بر اساس آب و هوا و بهبود فنی دستگاه‌ها متمرکز است که البته این امر ممکن است با سیاست‌های ملی چین در راستای گسترش طول عمر ساختمان‌های مرتفع برای تحقق پایداری طول عمر مطابقت نداشته باشد [۱۳]. بنابراین این مقاله در پاسخ به پارامترهای عملیاتی متغیر با زمان، به استراتژی‌هایی می‌پردازد که از نظر انرژی برای ساختمان‌های بلند کارآمد باشند تا بتوان انعطاف‌پذیری را از دیدگاه صنعت محقق نمود. نتایج حاصل از یک مطالعه ابتدا نشان می‌دهد که مدل دفتر به‌اضافه‌ی چند حیاط محوطه از نظر تهویه، دمای هوا، تابش حرارتی محیطی و اثربخشی صرفه‌جویی در انرژی حرارتی، تأثیر مثبتی روی سازگاری با محیط زیست دارد. دوم این که متوسط نرخ بهره‌وری انرژی از مدل دفتر به‌اضافه‌ی چند حیاط محوطه با پوشش فضای داخلی ۲۰-۸۰ درصد، از ۱۲/۸ تا ۴/۷ درصد است. سوم این که زمانی که محدوده‌ی پوشش فضای داخلی از ۵۰ تا ۶۰ درصد تغییر می‌کند؛ به نظر می‌رسد که نرخ بهره‌وری انرژی از ۱۰/۳ تا ۶/۵ درصد نوسان می‌کند و ظاهراً زمانی که پوشش فضای داخلی ۵۸ درصد باشد، این نقطه متغیر خواهد بود. طبق مقاله [۱۴]، دستگاه سایبان خورشیدی متحرک، وسیله‌ای کارآمد است که از گرم شدن بیش از حد ساختمان‌ها توسط نور خورشید، جلوگیری می‌کند. همچنین از این دستگاه‌ها می‌توان به‌منظور متعادل‌سازی گرمای ساختمان‌ها استفاده کرد. به‌عنوان مثال می‌توان از آن‌ها در طول شب به‌منظور کاهش فضاها گرمایش استفاده کرد. همچنین با جمع کردن آن در شب می‌توان خنکای شب را بیشتر استفاده نمود. سیستم کنترل سایه می‌تواند با به کار گرفتن این ویژگی‌ها به صرفه‌جویی در هزینه‌ی انرژی و کاهش اوج مصرف دست یابد. با این حال، تعریف استراتژی‌های کنترل مبتنی بر قوانین که بتواند به‌صورت همزمان هزینه‌های انرژی و نیز گرمایش بیش از حد را مینیمم‌سازی کند، دشوار است. در این مقاله، یک مدل اقتصادی^{۱۴} از کنترل پیش‌بینی برای گرمایش فضا ارائه می‌شود که در آن سایبان خورشیدی به‌عنوان یک کنترل‌کننده‌ی اضافی متغیر به کار رفته است. در این طرح پیشنهادی، مدل‌های جعبه سیاه استفاده شده است؛ زیرا آن‌ها برای ایجاد داده‌ها ارزان هستند. این موضوع برای گسترش مدل اقتصادی کنترل پیش‌بین در عمل اهمیت زیادی دارد. این مطالعه بر اساس آزمایش‌های شبیه‌سازی همزمان انجام شده است که در آن‌ها مدل‌های انرژی‌پلاس نماینده‌ی ساختمان‌های واقعی هستند و به این ترتیب نشان داده شده است که مدل اقتصادی کنترل پیش‌بین با توجه به کاهش گرمایش بیش از حد، هزینه‌های انرژی و پیک مصرف از هر دو کنترل‌کننده‌های مبتنی بر قوانین بهتر عمل می‌کند. همچنین نتیجه گرفته شده است که به کار گرفتن سایبان در اتاق‌های شمالی می‌تواند بسیار مفید واقع شود؛ زیرا در مقایسه با کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل بدون سایبان، هزینه و اوج مصرف انرژی را بیشتر کاهش داده است. مزایای مربوط به انرژی در طرح کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل پیشنهادی را می‌توان

به صورت یک "ارزش افزوده" به عنوان توجیه اقتصادی سرمایه‌گذاری برای دستگاه سایبان خورشیدی در نظر گرفت. در پایان، به‌طور کلی این پژوهش نسبت به پژوهش‌های گذشته دارای نوآوری و مزیت‌های بیشتری بوده‌است که در بخش‌های بعدی به‌طور کامل به تشریح آن پرداخته خواهد شد. ساختار مقاله به این شرح است: در قسمت دوم، به معرفی روش و مدل شناسایی سیستم جهت دریافت مدل و همچنین دو روش پیشنهادی دو رویکرد کنترل بهینه و کنترل پیش‌بین جهت بهینه‌سازی و کنترل مصرف انرژی در سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع در راستای حفظ شرایط مطلوب دمایی برای ساکنین پرداخته خواهد شد. در قسمت سوم، به نتایج شبیه‌سازی در قسمت شناسایی سیستم و ماتریس‌های خروجی آن و همچنین به مقایسه‌ی دو رویکرد کنترلی در بخش‌های ورودی و خروجی سیستم در به هدف رساندن این پژوهش پرداخته و در پایان، نتیجه‌گیری این پژوهش در قسمت چهارم بررسی خواهد شد.

۲- روش پیشنهادی

در این قسمت با توجه به شکل (۲)، مدل و روش اصلی این پژوهش به‌طور کامل مشخص شده است. در این پژوهش ابتدا یک مدل ساختمانی در نرم‌افزار انرژی پلاس طراحی و سپس تمام داده‌های ورودی و خروجی جهت شناسایی از این نرم‌افزار استخراج می‌شوند. داده‌های مورد نظر و انتخابی جهت شناسایی سیستم در این پژوهش به ۶ ورودی و ۴ خروجی تقسیم می‌گردند که برای سه ماه در اوایل سال میلادی دریافت شده‌اند و در ادامه درباره‌ی معرفی ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم به تفصیل بحث خواهد شد. پس از آن، شناسایی سیستم به‌روش مدل فضای حالت انجام می‌شود و ماتریس‌های متناظر با آن محاسبه خواهد شد.



شکل (۲): ساختار کلی سیستم شناسایی و کنترل پیشنهادی برای انرژی ساختمان

Figure (2): General structure of the proposed identification and control system for the energy consumption of buildings

در این پژوهش برخلاف اکثر پژوهش‌های صورت گرفته، داده‌های استفاده شده در قسمت شناسایی سیستم با فرض ایزوله نبودن اتاق‌ها و ارتباط دمایی بین اتاق‌ها دریافت شده است که می‌تواند یکی از مزایا و نوآوری‌های این پژوهش نسبت به سایر پژوهش‌های در این زمینه باشد. در این قسمت لازم به توضیح است که مدل دینامیکی ساختمان در این تحقیق مشابه بسیاری از پژوهش‌های گذشته به‌صورت مدل فضای حالت در نظر گرفته شده و توسط روش تحلیل زیرفضا^{۱۵} که یکی از روش‌های مربوط به مدل فضای حالت است شناسایی می‌شود. نتایج شناسایی سیستم در بخش شبیه‌سازی ارائه شده است. پس از این مرحله مدل فضای حالت محاسبه شده به‌عنوان مدل کنترل پیش‌بین به کنترل کننده معرفی می‌شود تا دمای اتاق‌های مورد نظر به‌وسیله‌ی کنترل کننده به دماهای انتخاب شده توسط کاربر یا نقطه‌ی آسایش دمایی ساکنان برسد. همچنین طراحی مدل فضای حالت برای این گونه سیستم‌ها است که می‌تواند از دیگر نوآوری‌های این مقاله باشد. در این پژوهش دو روش پیشنهادی جهت کنترل دمای ورودی

کنترل‌کننده معرفی می‌گردد. در ابتدا رویکرد کنترل بهینه و سپس رویکرد کنترل پیش‌بین و در نهایت مقایسه و انتخاب یکی از این دو روش در راه‌اندازی کنترل‌کننده در دستور کار قرار می‌گیرد که در قسمت‌های آینده به تشریح جزئیات و روش آن‌ها پرداخته خواهد شد. شایان ذکر است که جهت دریافت مدلی مناسب با ورودی و خروجی‌های موجود در راستای مدل فضای حالت و انتخاب ورودی و خروجی‌های آن از مقاله شماره [۸]، استفاده شده است که کدام متغیرها به‌عنوان ورودی شناسایی سیستم و کدام به‌عنوان خروجی‌های سیستم شناسایی استفاده گردد و با توضیح بر شناسایی سیستم بر پایه مدل فضای حالت، استفاده از این نوع مدل در انجام این پژوهش را مثمر ثمر خوانده است. زیرا نه تنها این مدل برای سیستم‌های چندورودی-چندخروجی به‌خوبی جواب می‌دهد، بلکه همیشه از جمله مدل‌های استقبال‌شده در مقالات بوده است.

۲-۱- شناسایی سیستم

جهت محاسبه‌ی یک مدل ریاضی و یا شناسایی سیستم، به گروهی از داده‌های ورودی و خروجی نیاز است [۱۵،۱۶]. با توجه به موضوع این پژوهش از داده‌های آب و هوایی استخراج‌شده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس استفاده می‌شود. اما پس از دریافت اطلاعات دمایی پژوهش وارد مرحله شناسایی سیستم و انتخاب نوع مدل می‌شود که مدل شناسایی سیستم به روش تحلیل زیرفضا که مربوط به شاخه‌ی مدل فضای حالت است صورت می‌گیرد و در ادامه پس از معرفی مدل ساختمان در مورد آن به‌طور کامل توضیح داده خواهد شد. لازم به ذکر است که به‌طور کلی تمام مواردی که سبب اتلاف انرژی می‌شوند مانند درب‌ها، پنجره‌ها در نرم‌افزار انرژی‌پلاس قابل اعمال است که تمام این موارد در مدل دینامیکی سیستم تأثیرگذار خواهد بود و اثر خود را در پارامترهای ماتریس‌های مدل فضای حالت نشان می‌دهد. طبق توضیحات فوق در ابتدا یک ساختمان جهت دریافت داده‌ها نیاز است که در این پژوهش از چند نرم‌افزار معماری و انرژی جهت دریافت آن‌ها استفاده می‌شود که در ادامه به توضیحات آن پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، ساختمان مدل‌شده در این پژوهش یک ساختمان تجاری با مساحت ۱۵۰ مترمربع، متشکل از ۴ اتاق^{۱۶} است. با توجه به نقشه، در این ساختمان تمامی شرایط آسایشی اعم از پارکینگ و فضای سبز در بیرون از ساختمان در نرم‌افزار اتوکد^{۱۷} برای مراجعین در قالب نقشه فراهم شده است. اما از نگاه داخلی ساختمان با توجه به مترآژ مشخص شده، دو اتاق در ابتدا و دو اتاق دیگر در انتهای مجتمع و همچنین دو عدد گلدان و یک نیمکت در وسط مجتمع جهت رفاه مشتریان قابل مشاهده است. در این پژوهش شرایط اقلیمی برای ساختمان مورد نظر در شهر اصفهان و همچنین در اواخر فصل زمستان و اوایل بهار به دلیل تغییرات زیاد دمایی انتخاب شده است. شکل (۴) نیز نمایی از خارج ساختمان موردنظر را نشان می‌دهد که در نرم‌افزار تری‌دی مکس^{۱۸} شبیه‌سازی شده است. نکته‌ی حائز اهمیت در این ساختمان وجود ارتباط دمایی هر کدام از اتاق‌ها با محیط بیرون است. شایان ذکر است تمامی شرایط ایزولاسیون برای کل ساختمان و هر کدام از واحدها لحاظ شده است؛ اما تک‌تک اتاق‌ها با یک‌دیگر و همچنین محیط بیرون ارتباط دمایی دارد. همچنین این اتفاق می‌تواند به‌عنوان یک چالش در سیستم قرار گیرد؛ زیرا تعداد ورودی‌ها بیشتر شده و طبیعتاً درصد انطباق پایین می‌آید، اما در این پژوهش به‌خوبی با آن هم برخورد شده است.

در ادامه برای به‌دست آوردن مدل به گروهی از داده‌های دقیق برای استفاده از آن‌ها به‌عنوان ورودی و خروجی نیاز است که در این قسمت تمامی داده‌های موجود از نرم‌افزار انرژی‌پلاس استخراج شده‌اند. داده‌ها در شهر اصفهان و طی سه ماه اولیه‌ی سال میلادی یعنی اواخر فصل زمستان و اوایل فصل بهار برای یک ساختمان تجاری ۴ واحدی انتخاب شده‌اند. نکته‌ی حائز اهمیت در این موضوع این است که در این موقع از سال، تغییرات زیاد آب‌وهوایی در شهر اصفهان وجود دارد و به‌همین دلیل این فصل‌ها جهت دریافت اطلاعات انتخاب شده‌اند. همچنین داده‌ها در فاصله‌ی زمانی ۱۵ دقیقه‌ای در هر روز انتخاب شده‌اند، یعنی با احتساب ۲۴ ساعته شبانه‌روز ۹۶ داده در هر روز استخراج شده است.

به‌طور کلی با توجه به این‌که اطلاعات مختلفی از سیستم در اختیار کاربر وجود دارد، اما برای شناسایی این سیستم، ۶ ورودی و ۴ خروجی انتخاب می‌شود که متغیرهای ورودی عبارتند از میزان توان خورشید در ساعات مختلف شبانه‌روز، میزان دمای خارجی ساختمان در ساعات مختلف و میزان توان مصرفی هر کدام از واحدها (۴ واحد) توسط سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه-مطبوع و همچنین متغیرهای خروجی سیستم که میزان دمای داخلی هر واحد را نشان می‌دهند.



شکل (۳): نمایی از نقشه‌ی ساختمان طراحی شده در نرم‌افزار اتوکد
Figure (3): Overview of the building plan designed in AutoCAD



شکل (۴): نمایی از فضای خارج ساختمان طراحی شده در نرم‌افزار تری‌دی‌مکس
Figure (4): Overview of the exterior designed in 3DMax

شایان ذکر است در این قسمت با توجه به وجود چهار واحد در ساختمان، برای کل سیستم ۴ خروجی در نظر گرفته شده است. با توجه به درجه‌ی سیستم، ماتریس A یک ماتریس مربعی ۴×۴، ماتریس B یک ماتریس ۴×۶ و ماتریس C یک ماتریس ۴×۴ می‌شود. همچنین ماتریس D در این قسمت برابر صفر در نظر گرفته شده است. اما نکته‌ی حائز اهمیت در این پژوهش و تفاوت اصلی این پژوهش با پژوهش‌های قبلی تعیین قسمتی از متغیرهای ورودی مدل شناسایی به عنوان اغتشاش برای این نوع مدل است. در این پژوهش ۲ سطر از ماتریس B یعنی «میزان توان خورشید» و «میزان دمای خارج ساختمان» به عنوان اغتشاش سیستم از ماتریس B جدا و در ماتریسی به نام G به مدل اضافه می‌شود. ذکر این نکته در این قسمت لازم است که در زمان

کدنویسی و شناسایی سیستم، ستون‌های اول و دوم، برای توان خورشید و دمای خارج ساختمان در نظر گرفته شدند. با توجه به توضیحات صورت گرفته در این قسمت لازم به توضیح است که به دلیل این که از روش تحلیل زیرفضا جهت انجام این پژوهش استفاده شده است، لذا مدل شناسایی شده طبق رابطه (۱) به دست خواهد آمد. ماتریس‌های A و C بدون تغییر و به همان حالت 4×4 باقی می‌مانند، اما ماتریس B به یک ماتریس 4×4 که فقط شامل ورودی‌های تهویه مطبوع است تغییر می‌یابد و ماتریس G که یک ماتریس 4×2 است به عنوان اغتشاش به مدل سیستم اضافه می‌شود. همچنین ماتریس X_k ماتریس حالت سیستم است که یک ماتریس 4×1 است، ماتریس u_k ماتریس ورودی سیستم است که یک ماتریس 4×1 است و ماتریس W_k ماتریس ورودی-های توان خورشید و دمای بیرون است که به صورت داده‌های واقعی و به عنوان اغتشاش سیستم در یک ماتریس 2×1 به سیستم معرفی و اعمال می‌شوند.

$$\begin{cases} X_{k+1} = AX_k + BU_k + CW_k \\ Y_k = CX_k \end{cases} \quad (1)$$

۲-۲- کنترل کننده

با توجه به مباحث بیان شده پس از دستیابی به مدل ساختمانی و مدل فضای حالت استخراج شده برای این سیستم، مرحله‌ی کنترل سیستم‌های تهویه مطبوع و همچنین بهینه‌سازی مصرف انرژی آغاز می‌شود. در این پژوهش از کنترل کننده‌ی پیش‌بین مبتنی بر مدل جهت کنترل دمای محیط ساختمان استفاده می‌شود. مضاف بر این، دو نوع روش کنترلی با عنوان رویکرد کنترل بهینه و کنترل پیش‌بین جهت راه‌اندازی و کنترل این سیستم ارائه می‌شود و مقصود آن است که با مقایسه‌ی آن‌ها، یکی از روش‌های کنترلی به عنوان هدف اصلی جهت کنترل دمای داخلی و آسایش دمایی ساکنان ساختمان قرار گیرد. اما در ابتدا توضیحات مربوط به روش کنترل بهینه در این پژوهش در دستور کار قرار می‌گیرد. در این مرحله از شبیه‌سازی در جهت بهینه‌سازی سیستم و حل به روش رویکرد کنترل بهینه از روش تنظیم کننده‌ی درجه دوم خطی^{۱۹} استفاده می‌شود. در این روش از وزن‌ها و ورودی‌های مشابه با رویکرد کنترل پیش‌بین در جهت بهینه‌سازی و راه‌اندازی کنترل کننده در راستای به هدف رساندن موضوع مورد نظر استفاده می‌شود که به منظور بهینه‌سازی سیستم مورد نظر، تابع هزینه و مدل سیستم به صورت رابطه (۲) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{cases} \dot{X} = Ax(t) + Bu(t) \\ \min J = \int_{t_2}^{t_1} [(x - x_R)^T Q (x - x_R) + u^T Ru] dt \\ u = -Kx \end{cases} \quad (2)$$

با توجه به رابطه (۲)، A و B ماتریس‌های مدل سیستم، x متغیرهای حالت سیستم، X_R به عنوان ورودی مرجع مورد نظر و X ورودی کنترلی اعمال شده به سیستم است. همچنین R و Q ماتریس‌های وزنی هستند که در این پژوهش برابر ۴ در نظر گرفته شده است که بنا بر الویت هدف تعیین شده تنظیم می‌گردند. به عبارتی دیگر چنانچه هدف ردیابی نقطه‌ی تنظیم برای ورودی حالت سیستم مهم‌تر از انرژی مصرفی ورودی کنترل باشد، ماتریس وزنی Q نسبت به R بزرگتر در نظر گرفته می‌شود [۱۷]. اما در طرف مقابل، در این مرحله از شبیه‌سازی، ابتدا مدل فضای حالت به عنوان مدل کنترل کننده‌ی پیش‌بین به سیستم معرفی می‌شود. در ابتدا ذکر این نکته لازم است که شرایط اولیه برای ورودی‌های سیستم تهویه مطبوع در ساعت ۰۰:۰۰ برابر صفر در نظر گرفته شده و همچنین جهت محاسبه‌ی X_k یا به عبارتی ماتریس حالت سیستم، یک حالت اولیه هم از ساعت ۰۰:۰۰ از خروجی سیستم و یا به عبارتی دیگر دمای داخلی چهار اتاق دریافت شده است که در واقع یک ماتریس 4×1 برای این مسئله در نظر گرفته می‌شود. اما با توجه به این که افق پیش‌بین برابر ۴ در نظر گرفته شده است، بنابراین در این حالت داده‌های ورودی سیستم با فاصله‌ی ۴ نمونه‌ی ۱۵ دقیقه‌ای یا به عبارتی دیگر نمونه‌های یک ساعته برای این سیستم در نظر گرفته می‌شود و داده‌ها با افق ۴ و به صورت یکی یکی تا داده‌ی ۹۶ تخمین زده می‌شوند. تابع هدف این سیستم به صورت رابطه (۳) در نظر گرفته می‌شود.

$$\left\{ \begin{array}{l} J = \sum_{i=1}^{96} \sum_{j=1}^4 \lambda \left(\|Y_{ij} - T_{R_{ij}}\| \right) + \|u_{ij}\| \\ \text{Minimize } J (i=1\dots 4). (j=1\dots 4) \end{array} \right. \quad (3)$$

هدف از به کار بردن یک روش کنترلی، کمینه کردن تابع هدف است که در این جا با حرف J مشخص شده است. همان طور که در رابطه‌ی (۳) یا تابع هزینه این سیستم مشخص شده است، Y دمای داخلی ساختمان یا خروجی سیستم و Tr دماهای مرجع برای این سیستم محسوب می‌شوند. همچنین u برابر ورودی‌های سیستم یا به عبارتی دیگر توان مصرفی سیستم تهویه مطبوع است. در این قسمت ابتدا دمای واقعی داخلی ساختمان یا به عبارتی دیگر خروجی سیستم از دمای مرجع کم می‌شود. سپس تک تک ورودی‌ها برای هر چهار واحد وارد مرحله بهینه‌سازی شده و به تابع هزینه اضافه می‌شود. لازم به ذکر است که مقدار λ همان ماتریس وزنی سیستم است که در این قسمت همانند رویکرد بهینه جهت مقایسه برابر ۴ در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل این که هدف اصلی این پژوهش ردیابی دقیق دمای ورودی مرجع بوده است؛ لذا هدف تابع هزینه بیشتر باید کمینه کردن خطای ردیابی باشد. به همین خاطر مقدار تابع وزنی به صورت مستقیم فقط در خطای ردیابی ضرب می‌شود. در این رابطه مقدار i نمایانگر زمان از ۱ تا ۴ نمونه برابر ۰۰:۱۵ تا ۱:۰۰ بامداد و ادامه‌ی آن در ساعات آتی و از طرفی دیگر، j نمایانگر تعداد اتاق‌ها است. نتایج این شبیه‌سازی به همراه تفسیر هر کدام از خروجی‌ها و همچنین مقایسه‌ی این دو رویکرد در قسمت سوم به طور کامل نمایش داده شده است.

۳- شبیه‌سازی

در این قسمت در مورد نتایج شبیه‌سازی در شناسایی سیستم، کنترل کننده، بهینه‌سازی، تمامی شکل‌های آن‌ها و نتایج دو روش متفاوت به تفصیل بحث خواهد شد. همچنین دو روش انجام شده در قسمت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی شناسایی سیستم

در این پژوهش جهت شناسایی سیستم و استخراج مدل فضای حالت استفاده می‌شود. با توجه به توضیحات بخش سوم، مدل‌سازی سیستم بر اساس یک سیستم شش ورودی و چهار خروجی انجام شده است که می‌توان با توجه به مدل فضای حالت، ماتریس‌های خروجی سیستم و همچنین شکل حاصل شده پس از شناسایی مدل را در ادامه مشاهده نمود. ماتریس‌های A، B، C و D به شکل زیر به دست می‌آیند:

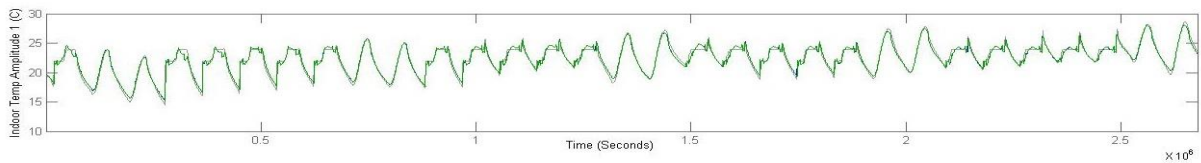
$$A = \begin{bmatrix} 0.4882 & 0.327 & -0.6454 & -0.4839 \\ 0.02533 & 0.05753 & -0.5551 & -0.475 \\ -0.2017 & -0.1682 & 0.3935 & -0.322 \\ 0.001541 & 0.06691 & 0.09751 & 1.019 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.06212 & -0.07864 & -0.229 & 0.156 & 0.124 & 0.124 \\ 0.1229 & 0.01424 & -0.258 & -0.0139 & -0.02685 & -0.02685 \\ 0.02059 & -0.02985 & 0.01676 & -0.07452 & 0.03852 & 0.03852 \\ -0.01096 & 0.001679 & -0.02683 & 0.003971 & 0.002469 & 0.002469 \end{bmatrix}$$

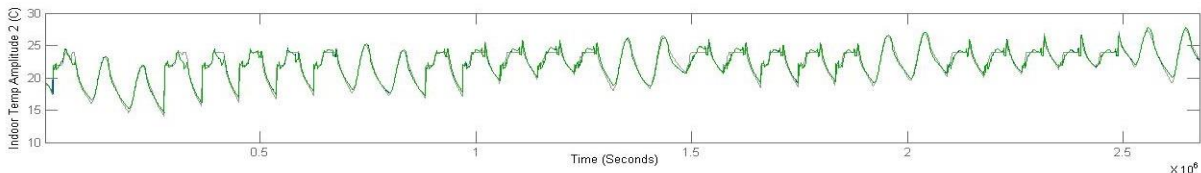
$$C = \begin{bmatrix} 3.163 & 11.68 & 0.001383 & 7.753 \\ 4.878 & 14.04 & -5.18 & 4.491 \\ 6.368 & 13.04 & 0.05391 & 2.491 \\ 9.093 & 15.84 & -4.581 & -0.9449 \end{bmatrix}$$

$$D = 0$$

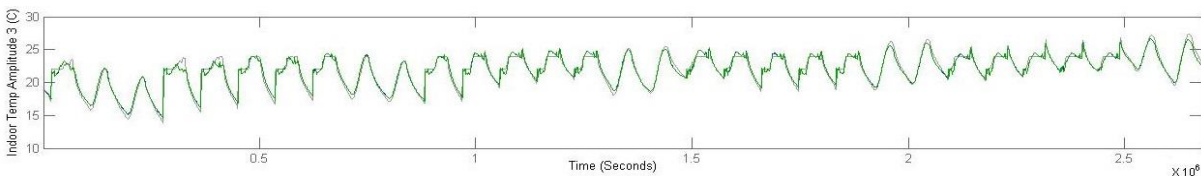
شکل‌های (۵)، (۶)، (۷) و (۸) به ترتیب مربوط به نتایج شناسایی سیستم برای اتاق‌های اول، دوم، سوم و چهارم است که میزان درصد انطباق ورودی‌ها و خروجی‌ها برای شناسایی این اتاق‌ها به ترتیب برابر با ۷۹/۲۳٪، ۷۷/۵۲٪، ۷۸٪ و ۷۷/۲۲٪ به دست آمده است. لازم به توضیح است که در این شکل‌های شبیه‌سازی، محور طول زمان را بر حسب ثانیه و محور عرض میزان تغییر مقدار دامنه‌ی دمای داخلی هر کدام از اتاق‌ها را بر حسب درجه‌ی سانتی‌گراد نشان می‌دهد.



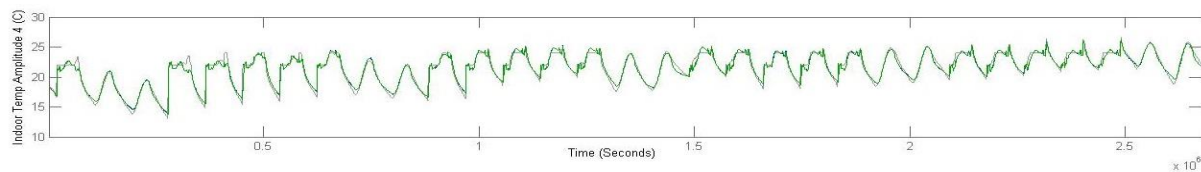
شکل (۵): میزان درصد انطباق شناسایی سیستم اتاق اول
Figure (5): Compatibility percentage of the identification system of the first room



شکل (۶): میزان درصد انطباق شناسایی سیستم اتاق دوم
Figure (6): Compatibility percentage of the identification system of the second room



شکل (۷): میزان درصد انطباق شناسایی سیستم اتاق سوم
Figure (7): Compatibility percentage of the identification system of the third room



شکل (۸): میزان درصد انطباق شناسایی سیستم اتاق چهارم
Figure (8): Compatibility percentage of the identification system of the fourth room

در اینجا ذکر این نکته حائز اهمیت است که با توجه به توضیحات ارائه شده در زیربخش (۲-۱) و همچنین مدل طراحی شده و رابطه (۱)، ماتریس‌های B جدید یا به عبارتی B' و G به صورت زیر به دست خواهند آمد:

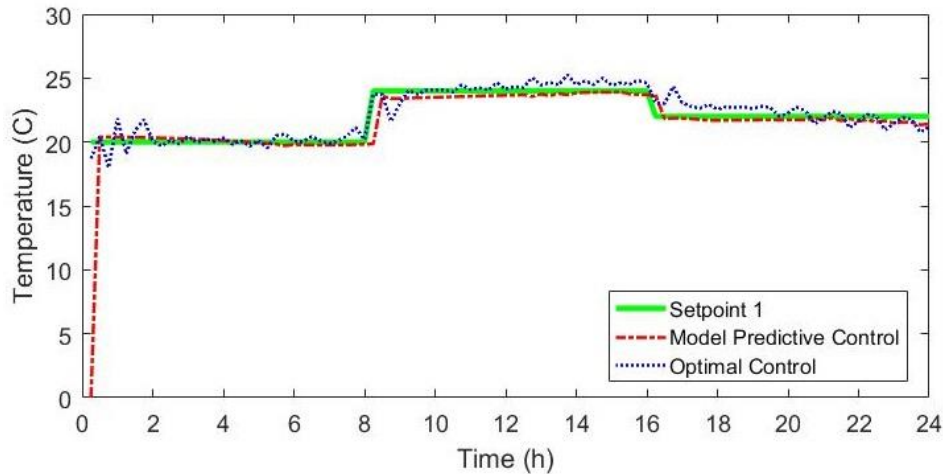
$$B' = \begin{bmatrix} -0.229 & 0.156 & 0.124 & 0.124 \\ 0.258 & -0.0139 & -0.02685 & -0.02685 \\ 0.001676 & -0.07452 & 0.03852 & 0.03852 \\ -0.02683 & 0.003971 & 0.002469 & 0.002469 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.06212 & -0.07864 \\ 0.1229 & 0.01424 \\ 0.02059 & -0.02985 \\ -0.01096 & 0.001679 \end{bmatrix}$$

۳-۲- شبیه‌سازی در جهت کنترل سیستم

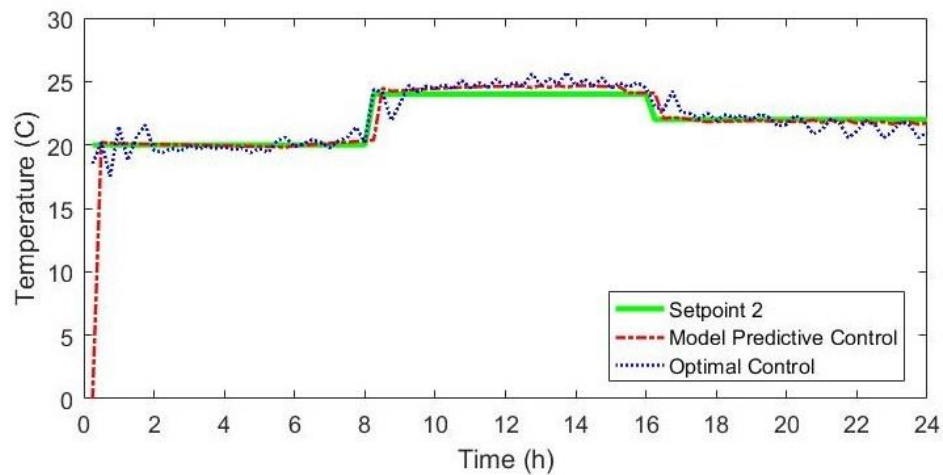
در این قسمت خروجی دو رویکرد کنترلی توضیح داده شده بررسی می‌شوند. در شکل‌های (۹)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) نتایج شبیه‌سازی مربوط به کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین و بهینه نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، رویکرد کنترل پیش‌بین دقت بیشتری در رساندن دمای هوا به نقطه‌ی مرجع نسبت به رویکرد کنترل بهینه داشته که در مقایسه با رویکرد بهینه دارای مقدار خطای کمتری بوده است. جهت محاسبه‌ی این مقدار خطا، با توجه به این که اختلاف دمای درخواستی با دمای داخلی هر اتاق که متأثر از توان سیستم تهویه مطبوع بوده و در تمام لحاظات بیان‌گر عملکرد سیستم کنترل است؛ بنابراین یک معیار جهت

تعیین عملکرد سیستم کنترل مشخص شده که در واقع محاسبه‌ی میانگین اختلاف دمای مرجع از دمای داخلی هر اتاق در هر لحظه است. یا به عبارتی دیگر میانگین خطا در تمام لحظات برای تمام نواحی به‌عنوان عملکرد سیستم کنترل در نظر گرفته شده که پس از محاسبه، این مقدار خطا برای رویکرد پیش‌بین برابر $0/5$ درجه سانتی‌گراد بوده که در مقایسه با رویکرد بهینه که این مقدار برابر $0/8$ درجه سانتی‌گراد بوده دارای مقدار خطای میانگین کمتری بوده است. همچنین میزان خطای حالت ماندگار برای حالت کنترل پیش‌بین برای ۹۶ داده برابر $0/4$ درجه سانتی‌گراد بوده که می‌تواند از دیگر مزیت‌های این رویکرد نسبت به رویکرد بهینه باشد.



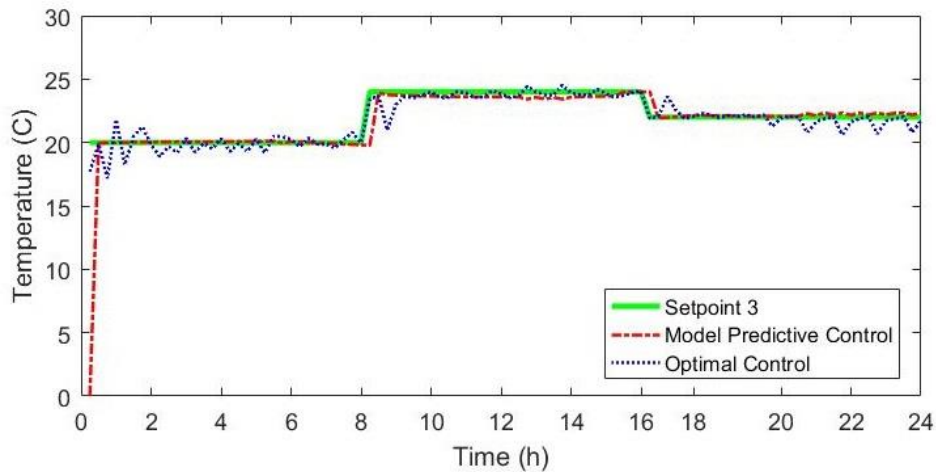
شکل (۹): مقایسه‌ی دمای اتاق اول با روش‌های پیش‌بین و بهینه

Figure (9): Comparison of the first room temperature with the model predictive and optimal control



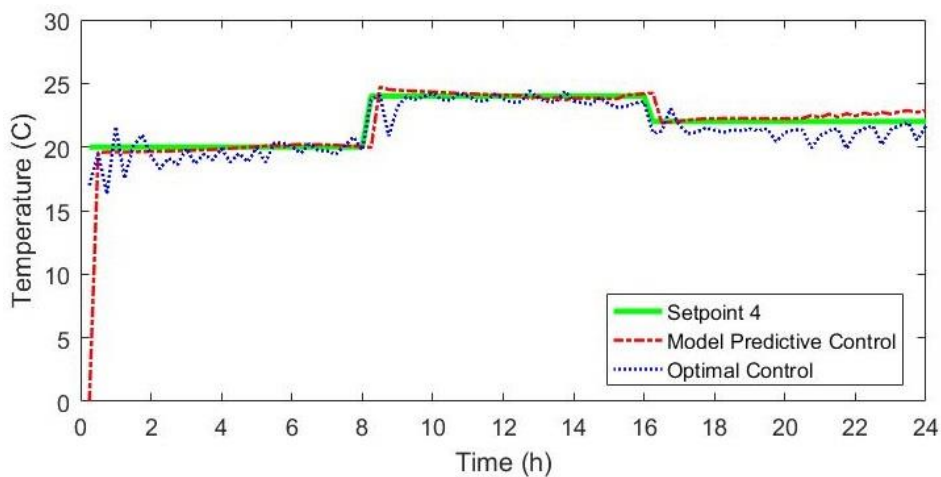
شکل (۱۰): مقایسه‌ی دمای اتاق دوم با روش‌های پیش‌بین و بهینه

Figure (10): Comparison of the second room temperature with the model predictive and optimal control



شکل (۱۱): مقایسه‌ی دمای اتاق سوم با روش‌های پیش‌بین و بهینه

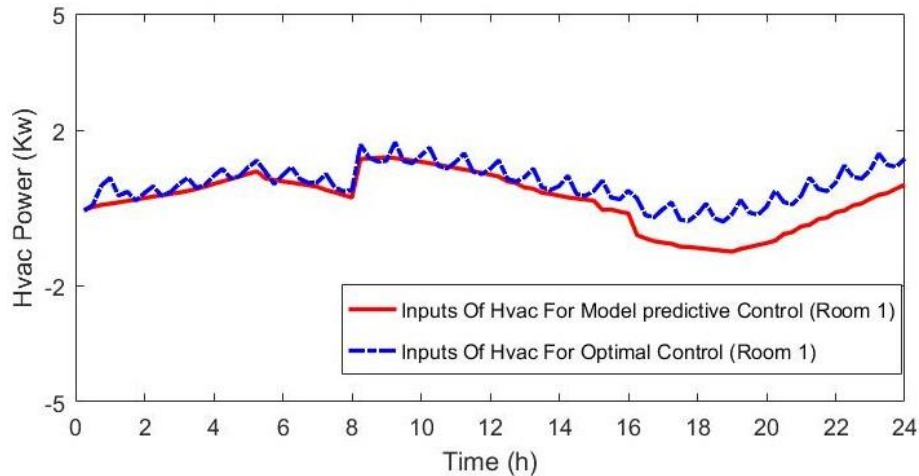
Figure (11): Comparison of the third room temperature with the model predictive and optimal control



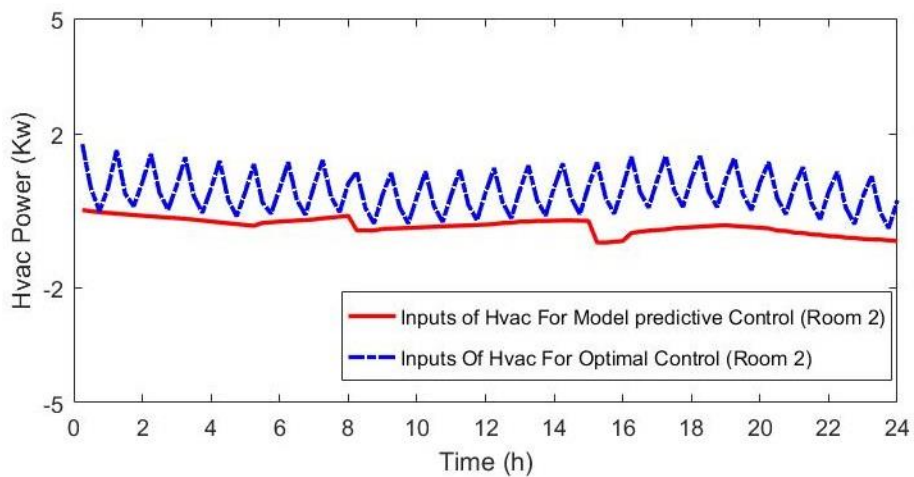
شکل (۱۲): مقایسه‌ی دمای اتاق چهارم با روش‌های پیش‌بین و بهینه

Figure (12): Comparison of the fourth room temperature with the model predictive and optimal control

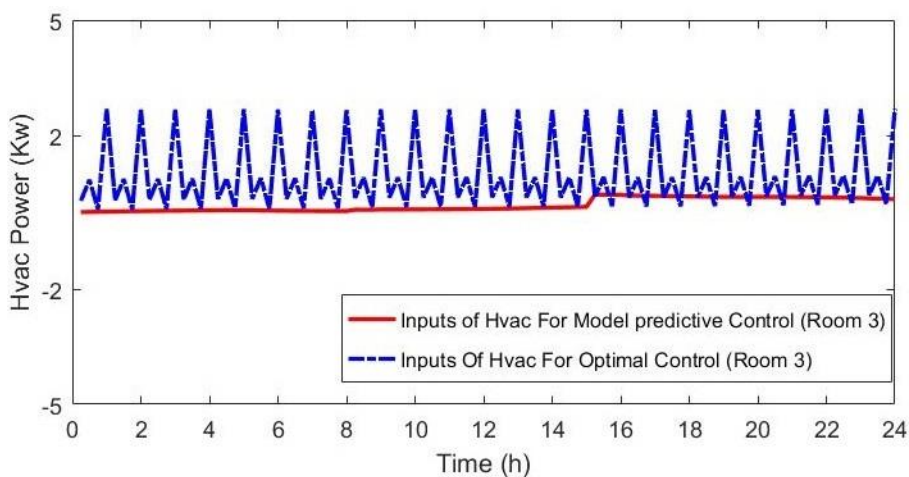
اما از نگاهی دیگر، شکل‌های (۱۳)، (۱۴)، (۱۵) و (۱۶)، مقایسه‌ی ورودی‌های سیستم تهویه مطبوع را در هر دو رویکرد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، میزان مصرف انرژی در ساعاتی از شبانه روز مخصوصاً در اتاق‌های سوم و چهارم در رویکرد کنترل پیش‌بین بسیار کم یا نزدیک به صفر بوده است. همچنین میزان نوسان در بهینه‌سازی ورودی‌های سیستم در رویکرد کنترل پیش‌بین بسیار کم‌تر از رویکرد بهینه بوده است که این اتفاق می‌تواند مانع از آسیب رسیدن به سیستم تهویه مطبوع در دراز مدت شود. همچنین نهایت مصرف انرژی برای سیستم رویکرد کنترل پیش‌بین کمتر از ۲ کیلووات بر ساعت بوده است که در مقایسه با رویکرد بهینه، عملکرد بهتری در بهینه‌سازی ورودی‌ها داشته است. به‌طوری که همان‌طور که توضیح داده شد، در بعضی از ساعات در اتاق‌های سوم و چهارم میزان مصرف تقریباً صفر بوده است که می‌تواند یکی دیگر از عوامل برتری کنترل پیش‌بین نسبت به رویکرد کنترل بهینه باشد.



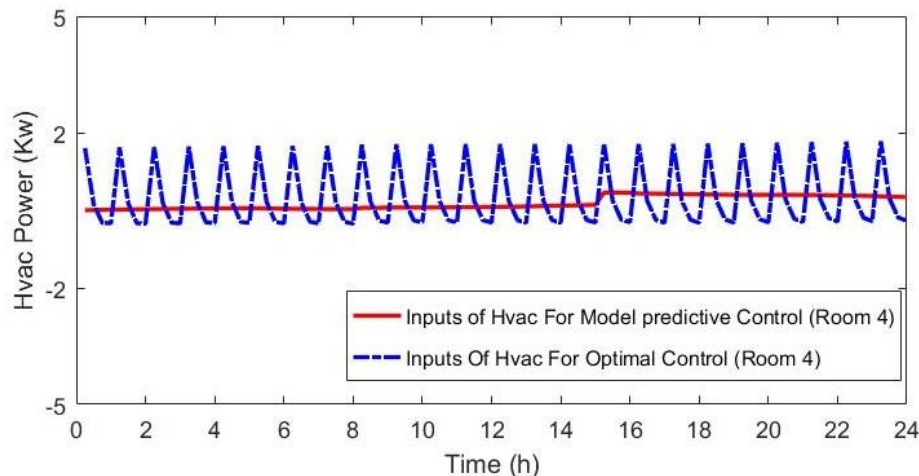
شکل (۱۳): مقایسه‌ی میزان توان مصرفی ورودی سیستم تهویه مطبوع برای اتاق اول
Figure (13): Comparison of power consumption input of the HVAC system of the first room



شکل (۱۴): مقایسه‌ی میزان توان مصرفی ورودی سیستم تهویه مطبوع برای اتاق دوم
Figure (14): Comparison of power consumption input of the HVAC system of the second room



شکل (۱۵): مقایسه‌ی میزان توان مصرفی ورودی سیستم تهویه مطبوع برای اتاق سوم
Figure (15): Comparison of power consumption input of the HVAC system of the third room



شکل (۱۶): مقایسه‌ی میزان توان مصرفی ورودی سیستم تهویه مطبوع برای اتاق چهارم
Figure (16): Comparison of power consumption input of the HVAC system of the fourth room

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع در کنار حفظ آسایش حرارتی برای ساکنان به روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل برپایه‌ی مدل فضای حالت ساختمان بوده است. در راستای انجام این پژوهش، در ابتدا یک مجتمع تجاری با چهار فروشگاه با ابعاد مختلف و با در نظر گرفتن ارتباط دمایی بین اتاق‌ها و فضای بیرون ساختمان، طراحی و سپس داده‌های آب و هوایی با توجه به موقعیت جغرافیایی و بافت اصلی ساختمان از نرم‌افزار انرژی پلاس دریافت شد. در مرحله‌ی بعد، شناسایی سیستم با استفاده از داده‌های موجود بر اساس مدل فضای حالت در جهت استفاده‌ی آن به‌عنوان مدل کنترل پیش‌بین انجام شد. همچنین دمای بیرون ساختمان و میزان توان انرژی خورشید به‌عنوان اغتشاش در نظر گرفته شدند که در نهایت به مدل اصلی جهت کنترل اضافه شدند. در ادامه جهت استفاده از مدل استخراج‌شده، دو رویکرد کنترل پیش‌بین و کنترل بهینه به‌منظور کنترل سیستم‌های تهویه مطبوع و در نهایت مقایسه با یکدیگر برای این پژوهش ارائه شدند. از نگاهی دیگر در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی، ورودی‌های سیستم تهویه مطبوع محاسبه و سپس جهت ایجاد آسایش حرارتی برای ساکنان بهینه و کنترل شدند. در پایان، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل دارای خطای حالت ماندگار $0/4$ است که نه تنها میزان مصرف انرژی کمتری نسبت به رویکرد کنترل بهینه داشت، بلکه عملکرد خوب کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مبتنی بر مدل را نسبت به روش کنترل بهینه در راستای حفظ شرایط مطلوب دمایی برای ساکنین در ۲۴ ساعت را نشان داد.

References

مراجع

- [1] M. Movahedpour, S. Mohammadi, M. Kiani, T. Niknam, M. Zadehbagheri, "Optimal design of residential microgrids with regard to fault occurrence and possibility of power outage", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 10, no. 39, pp. 29-44, Autumn 2019 (in Persian).
- [2] M. Mahdavian N. Behzadfar "A review of wind energy conversion system and application of various induction generators", *Journal of Novel Researches on Electrical Power*, vol. 8, no. 4, pp. 55-66, Winter 2020 (in Persian).
- [3] M. A. Praprost, "Investigating energypplus as a simulation tool for deploying VOLTTRON transactive energy technologies in commercial buildings", *Case Western Reserve University*, pp. 1-153, May 2018 (doi: 0000-0001-7463-8427).
- [4] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, C. Pout, "A review on buildings energy consumption information", *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 3, pp. 394-398, Jan. 2008 (doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007).
- [5] K. D. Kolokotsa, A. Pouliezios, G. Stavarakakis, C. Lazos, "Predictive control techniques for energy and indoor environmental quality management in buildings", *Building and Environment*, vol. 44, no. 9, pp. 1850-1863, Sept. 2009 (doi: 10.1016/j.buildenv.2008.12.007).

- [6] J. Ma, J. Qin, T. Salsbury, P. Xu, "Demand reduction in building energy systems based on economic model predictive control", *Chemical Engineering Science*, vol. 67, no. 1, pp. 92-100, Jan. 2012 (doi: 10.1016/j.ces.2011.07.052).
- [7] J. Ma, J. Qin, T. Salsbury, "Economic model predictive control for building energy systems", *Proceeding of the IEEE/ICC*, pp. 1-6, Kanpur, India, Jan. 2011 (doi: 10.1109/ISGT.2011.5759140).
- [8] S. Royer, S. Thil, T. Talbert, M. Polit, "A procedure for modeling buildings and their thermal zones using co-simulation and system identification", *Energy and Buildings*, vol. 78, pp. 231-237, Aug. 2014 (doi: 10.1016/j.enbuild.2014.04.013).
- [9] T. Q. Péan, J. Salom, R. Costa-Castelló, "Review of control strategies for improving the energy flexibility provided by heat pump systems in buildings", *Journal of Process Control*, vol. 74, pp. 35-49, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.jprocont.2018.03.006).
- [10] D. H. Blum, K. Arendt, L. Rivalin, M. A. Piette, M. Wetter, C. T. Veje, "Practical factors of envelope model setup and their effects on the performance of model predictive control for building heating, ventilating, and air conditioning systems", *Applied Energy*, vol. 236, pp. 410-425, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.apenergy.2018.11.093).
- [11] A. Ryzhov, H. Ouerdane, E. Gryazina, A. Bischi, K. Turitsyn, "Model predictive control of indoor microclimate: existing building stock comfort improvement", *Energy Conversion and Management*, vol. 179, pp. 219-228, Jan. 2019 (doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.046).
- [12] M. J. Bursill, L. O'Brien, I. B. Morrison, "Morrison, multi-zone field study of rule extraction control to simplify implementation of predictive control to reduce building energy use", *Energy and Buildings*, vol. 222, Article: 110056, Sept. 2020 (doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110056).
- [13] J. Wei, Y.J. Zhang, "Exploring a strategy for tall office buildings based on thermal energy consumption from industrialized perspective: an empirical study in china", *Journal of Cleaner Production*, vol. 257, Article: 120497, June 2020 (doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120497).
- [14] M. D. Knudsen, S. Petersen, "Economic model predictive control of space heating and dynamic solar shading", *Energy and Buildings*, vol. 209, Article: 109661, Feb. 2020 (doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109661).
- [15] L. K. Ganjali-khani, F. Sheikholeslam, H. Mahdavi-Nasab, "System identification of a nonlinear multivariable steam generator power plant using time delay and wavelet neural networks", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 3, no. 12, pp. 67-73, Winter 2013 (in Persian).
- [16] R. Pirmoradi, S. M. Kargar, A. Zare-Bidaki, "Modeling distillation column using ARX model structure and artificial neural networks", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 3, no. 10, pp. 66-71, Spring 2013 (in Persian).
- [17] J. Swigart, S. Lall, "An explicit state-space solution for a decentralized two-player optimal linear-quadratic regulator", *Proceedings of the IEEE/ACC*, pp. 6385-6390, Baltimore, MD, USA, June 2010 (doi: 10.1109/ACC.2010.5531482).

زیر نویس‌ها:

1. Heating, ventilation and air conditioning systems (HVAC)
2. Energy management system (EMS)
3. Model predictive control
4. Variable air volume (VAV)
5. Energyplus
6. Autoregressive model (ARX)
7. Black box
8. Energy flexibility
9. Rule-based control
10. Gray box
11. Ryzhov
12. Rule extraction (RE)
13. Decision trees
14. Economic model predictive control (EMPC)
15. Subspace identification (4SID)
16. Zone
17. AutoCAD
18. 3DMAX
19. Linear quadratic regulator (LQR)