



Semnan University



Research Article

## Compressor and Set-Point Temperature Control of a Domestic Refrigerator Using Fuzzy Systems

Fahimeh Baghbani <sup>a,\*</sup>, Ahmadreza Bagheri <sup>b</sup>, Navid Yektay <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>b</sup> Sunflower Industrial Research Co. (SIRCO, Mashhad, Iran

### PAPER INFO

#### Paper history:

Received: 2023-10-22

Revised: 2024-06-10

Accepted: 2024-06-19

#### Keywords:

Intelligent control;  
Fuzzy systems;  
Domestic refrigerator;  
Temperature control.

### ABSTRACT

Domestic refrigerators have a noticeable contribution to energy consumption worldwide. Thus, it is beneficial to integrate control strategies for reducing their energy usage and improving their performance. The traditional hysteresis controller cannot perform effectively in the presence of uncertainties such as daytime or refrigerator door status. Additionally, most of the designed fuzzy controllers based on temperature error, do not address the door-opening behavior of the user. Hence, this paper employs fuzzy logic systems to improve the performance of domestic refrigerators. Based on the data collected from domestic users' door-opening events, the daytime is split into four time intervals and a fuzzy system is then designed to adjust the desired temperature of the refrigerator. Also, a fuzzy controller is designed to control the compressor speed according to the temperature error and the time of the day. A MATLAB refrigeration model is used to evaluate the proposed controller's performance. The results demonstrate lower energy consumption and better temperature set-point tracking for the proposed controller than a fuzzy controller without addressing user behavior in the fuzzy rules design.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31016.2550>

© 2025 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: [Baghbani.fahimeh@semnan.ac.ir](mailto:Baghbani.fahimeh@semnan.ac.ir)

### How to cite this article:

Baghbani, F. , Bagheri, A. and Yektay, N. (2025). Compressor and Set-Point Temperature Control of a Domestic Refrigerator Using Fuzzy Systems. Journal of Modeling in Engineering, 23(80), 21-30. doi: 10.22075/jme.2024.31016.2550

## کنترل کمپرسور و دمای مرجع برای یخچال خانگی با استفاده از سیستم‌های فازی

فهیمه باغبانی<sup>۱\*</sup>، احمدرضا باقری<sup>۲</sup>، نوید یکتای<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰	یخچال‌های خانگی سهم قابل توجهی در مصرف انرژی را دارند و لذا طراحی کنترل‌کننده مناسب جهت کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. روش کنترل مرسوم هیستریزس در حضور عدم قطعیت‌هایی همچون زمان روز و یا تعداد باز و بسته شدن درب نمی‌تواند کارایی متفاوتی از خود نشان دهد. همچنین بسیاری از کنترل‌کننده‌های فازی که بر اساس خطای دما طراحی شده‌اند، رفتار کاربر در باز و بسته کردن درب یخچال را در نظر نگرفته‌اند. لذا در این مقاله، سیستم‌های فازی جهت بهبود عملکرد یخچال خانگی بکار گرفته شده‌اند. بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از تعداد باز و بسته شدن درب، زمان‌های روز به چند بازه تقسیم شده‌اند و یک سیستم فازی برای تعیین دمای مرجع یخچال در طول روز طراحی شده است. همچنین یک کنترل‌کننده فازی با دریافت زمان روز و خطای دما از مقدار دمای مرجع، سرعت کمپرسور را کنترل می‌کند. روش پیشنهادی بر روی یک مدل سیمولینک از سیستم سردسازی در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده مصرف انرژی کمتر و خطای دمای کمتر روش پیشنهادی در مقایسه با یک کنترل فازی طراحی شده بدون در نظر گرفتن رفتار کاربر در طراحی قواعد فازی می‌باشد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰	
<b>واژگان کلیدی:</b> کنترل هوشمند، سیستم‌های فازی، یخچال خانگی، کنترل دما.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31016.2550>

© 2025 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

مطالعات بسیاری در زمینه افزایش کارایی یخچال انجام شده‌اند. از جمله آن‌ها می‌توان به کنترل دما [۲]، بررسی اثر دما بر روی کیفیت مواد غذایی [۳]، برفک‌زدایی [۴]، رطوبت‌زدایی [۵]، مدل‌سازی دینامیک یخچال [۶] و تاثیر باز و بسته کردن درب یخچال [۷] اشاره کرد. همچنین برخی از مطالعات به بررسی یخچال‌های هوشمند بر پایه اینترنت اشیا پرداخته‌اند [۸] و [۹].

سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی الهام‌گرفته از کارایی ذهن و مغز انسان می‌باشند. به دلیل ویژگی‌های مناسب آن‌ها از جمله خاصیت تقریب‌گری عمومی و یادگیری، در بسیاری از کاربردهای تصمیم‌گیری و کنترل مورد استفاده

یخچال‌ها یکی از وسایل برقی پرمصرف می‌باشند که تاثیر بسزایی در مصرف برق خانگی دارند. بر اساس گزارش موسسه بین‌المللی سردسازی (IIR)<sup>۲</sup>، صنعت سردسازی و تهویه مطبوع حدود ۲۰٪ از مصرف برق را در سراسر جهان به خود اختصاص داده است که سهم یخچال‌های خانگی حدود ۴٪ می‌باشد [۱]. وظیفه ابتدایی یک یخچال خانگی حفظ کیفیت مواد غذایی با نگه داشتن دمای داخلی یخچال در یک بازه مناسب است. لذا بهبود استراتژی کنترل کمپرسور می‌تواند در حفظ کیفیت مواد غذایی و همچنین کاهش مصرف انرژی نقش بسزایی داشته باشد.

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [Baghbani.fahimeh@semnan.ac.ir](mailto:Baghbani.fahimeh@semnan.ac.ir)

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲. شرکت دانش‌بنیان تحقیقات صنعتی آفتابگردان تابان شرق، مشهد، ایران

استناد به این مقاله:

<sup>2</sup> International Institute of Refrigeration

بر اساس دمای محفظه و بار گرمایی (وزن ماده غذایی) طراحی شده و به ۱.۷٪ کاهش مصرف انرژی دست یافته است. در نهایت، یک مطالعه مروری [۲۴]، به بررسی پژوهش‌های مختلف در زمینه کنترل فازی سیستم‌های تبرید پرداخته است.

برخی از مطالعات، رفتار کاربر یخچال در زمینه باز و بسته کردن درب را نیز در طراحی ساختار کنترل‌کننده لحاظ نموده‌اند. مطالعه [۲۵]، از شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی در کنترل یخچال خانگی استفاده نموده است. یک شبکه کوهون<sup>۸</sup> برای پیش‌بینی الگوی باز کردن درب یخچال مورد استفاده شده است. سپس مقدار پیش‌بینی شده و خطای دما بعنوان ورودی به سیستم فازی داده شده‌اند. مدل تقریبی مرتبه اول یخچال برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. نتایج کارایی بالاتر کنترل فازی در مقایسه با یک کنترل روشن-خاموش معمولی را نشان داده‌اند. مطالعه [۲۶]، یک سیستم فازی سرعت کمپرسور را با توجه به موقعیت درب یخچال کنترل می‌کند. با طراحی قواعد فازی مناسب سعی شده است که در حالیکه دمای مطلوب دنبال می‌شود؛ سرعت کمپرسور در کمترین میزان خود باشد. در نهایت مصرف انرژی ۳٪ کاهش داشته است. مطالعه جدیدی در [۲۷] از روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی وضعیت باز یا بسته بودن درب یخچال استفاده کرده است. سپس مقدار پیش‌بینی شده برای طراحی سه سیستم فازی برای کنترل سرعت کمپرسور، دمای مرجع و زمان برفک‌زدایی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها کاهش ۲.۵ تا ۴.۵ درصدی انرژی را نشان داده‌اند. نکته قابل توجه روش مرجع [۲۷] این است که روش‌های یادگیری ماشین با خطای ۲۰٪ باز یا بسته بودن درب در یک ساعت بعدی را پیش‌بینی می‌کنند؛ در حالیکه در طول روز معمولاً در ساعت بعدی درب یخچال حداقل یکبار باز می‌شود. این امر منجر به افزایش بار محاسباتی می‌شود. سپس در این مرجع با توجه به پیش‌بینی انجام‌شده و صحت یا عدم صحت آن، قواعد فازی طراحی می‌شوند؛ در حالیکه با لحاظ کردن رفتار کاربر در باز کردن درب، می‌توان بجای پیش‌بینی باز یا بسته شدن درب، زمان روز را در قواعد فازی دخیل کرد و سیستم فازی ساده‌تر و قابل درک‌تری ایجاد کرد.

قرار گرفته‌اند [۱۰]-[۱۲]. کنترل‌کننده‌های هوشمند در زمینه کنترل دما و مصرف بهینه انرژی یخچال نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه، [۱۳] جزو اولین مطالعات در زمینه کنترل فازی یخچال با کنترل‌کننده روشن-خاموش<sup>۳</sup> است. ورودی سیستم فازی خطای بین دمای مطلوب و واقعی داخل یخچال می‌باشد و وضعیت روشن-خاموش به عنوان خروجی گسسته‌شده سیستم فازی در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی کاهش ۳٪ انرژی مصرفی یخچال در مقایسه با یک کنترل‌کننده هیستریزس رایج را نشان داده‌اند. همچنین مطالعه [۱۴] دو سیستم فازی جهت کنترل دما و رطوبت یک یخچال با کمپرسور سرعت متغیر (VSC)<sup>۴</sup> طراحی نموده است.

بالغی و موسوی در [۱۵] کنترل دما و رطوبت یخچال با استفاده از کنترل‌کننده فازی-PID<sup>۵</sup> را مورد بررسی قرار داده‌اند و به کارایی بالاتر در مقایسه با کنترل‌کننده PID دست یافته‌اند. کنترل فازی دمای یک یخچال VSC در [۱۶] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی، ردیابی دمای مطلوب با خطای حالت ماندگار ناچیز را نشان داده‌اند. مطالعه [۱۷]، یک کنترل‌کننده فازی جهت کنترل فرکانس کمپرسور و مقدار بازشدگی شیر انبساط<sup>۶</sup> طراحی کرده است. همچنین دو کنترل‌کننده فازی جهت کنترل فرکانس کمپرسور و زاویه بازشدگی شیر انبساط در [۱۸] طراحی شده‌اند. همچنین روشی جهت تعیین توابع عضویت فازی برای کاهش نیاز به دانش فرد خبره و تنظیمات سعی و خطا معرفی شده است.

مطالعات دیگری نیز بر روی کنترل فازی VSC انجام شده‌اند. بطور مثال، یک سیستم فازی برای تعیین فرکانس کمپرسور بر اساس خطای دما و مشتق آن در [۱۹] ارائه شده است. پژوهش [۲۰]، دو سیستم فازی برای کنترل ظرفیت و دما را معرفی کرده است. مطالعه [۲۱] از کنترل فازی بر اساس دمای تبخیر و نرخ شار ماده<sup>۷</sup> جهت کنترل سیکل‌های سردسازی استفاده کرده است. همچنین مرجع [۲۲]، یک سیستم فازی برای یک سیستم خنک‌سازی، طراحی کرده و به خطای ردیابی کمتر و حذف نویز بهتر دست پیدا کرده است. در [۲۳]، یک کنترل‌کننده فازی جهت تنظیم سرعت فن و خاموش و روشن شدن کمپرسور

<sup>۶</sup> Expansion valve

<sup>۷</sup> Mass Flow Rate

<sup>۸</sup> Kohonen network

<sup>۳</sup> On-off

<sup>۴</sup> Variable Speed Compressor

<sup>۵</sup> Proportional-Integral-Derivative

غیرفازی‌ساز خروجی قطعی را از روی مجموعه‌های فازی بخش تالی ایجاد می‌کند.

یک قاعده فازی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

قاعده  $l$ : اگر  $x_1, A_1^l$  باشد و  $x_2, A_2^l$  باشد و ... و  $x_n, A_n^l$  باشد؛ آنگاه  $y, B^l$  است.

در عبارت بالا  $x_i$  ورودی نام سیستم فازی ( $i = 1, \dots, n$ )،  $y$  خروجی سیستم فازی،  $A_i^l$  تابع عضویت قاعده  $l$ ام تالی می‌باشد. با استفاده از فازی‌ساز منفرد، موتور استنتاج حاصلضرب و غیرفازی‌ساز میانگین مراکز، خروجی سیستم فازی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left( \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^M \left( \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right)} \quad (1)$$

که در آن  $\bar{y}^l$  مرکز مجموعه فازی  $B^l$  می‌باشد.

در صورتی که از غیرفازی‌ساز ماکزیمم استفاده شود؛ خروجی سیستم فازی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$y^* = \inf\{y \in \text{hgt}(B')\}, \quad (2)$$

که در آن،  $B'$  خروجی موتور استنتاج فازی است. همچنین  $\text{hgt}(B')$  مجموعه تمام نقاطی از  $y \in V$  است که مجموعه فازی  $\mu_{B'}(y)$  به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{hgt}(B') = \left\{ y \in V \mid \mu_{B'}(y) = \sup_{y \in V} \mu_{B'}(y) \right\} \quad (3)$$

### ۳- وضعیت درب یخچال

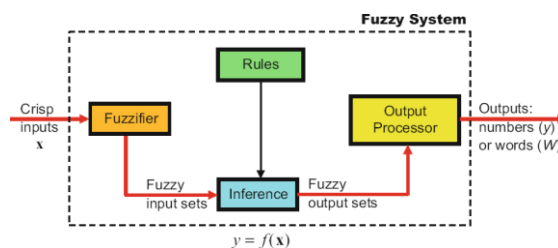
الگوی رفتار کاربران یخچال خانگی در باز و بسته کردن درب یخچال عموماً مشابه می‌باشد. داده‌های دو گروه (خانواده) از کاربران خانگی در بازه زمانی سه هفته جمع‌آوری شده‌اند و میانگین باز و بسته کردن درب یخچال برای هر گروه (مجموع تعداد باز شدن درب در هر ساعت تقسیم بر تعداد نفرات گروه) در هر ساعت در شکل (۲) نشان داده شده‌است. بر طبق شکل، باز کردن درب معمولاً بین ۷ صبح تا ۱۲ شب می‌باشد. همچنین داده‌های مرجع [۲۷] در شکل (۳) آورده شده‌اند. محور افقی زمان روز بر حسب ساعت و محور عمودی میانگین تعداد باز شدن درب  $DO^9$  را نشان می‌دهد. محور عمودی از میانگین گیری ابتدا برای هر یک از مشتریان ۱۸ گانه به صورت جداگانه و سپس

در نتیجه با الهام از پژوهش‌های بالا، پژوهش حاضر از سیستم‌های فازی، با در نظر گرفتن رفتار کاربر، جهت کنترل یک یخچال خانگی با کمپرسور سرعت متغیر استفاده نموده است؛ در حالیکه در اکثر کنترل‌کننده‌های فازی یخچال (همچون [۱۳]-[۱۸]) رفتار کاربر در نظر گرفته نشده است. همچنین در مقایسه با [۲۷]، بجای بررسی وضعیت باز یا بسته بودن درب، زمان روز در قواعد فازی اثر داده شود که بارمحاسباتی سیستم پیش‌بین رفتار کاربر را ندارد. با توجه به داده‌های وضعیت درب یخچال واقعی در ساعات روز، توابع عضویت و همچنین قواعد فازی مناسب جهت تنظیم دمای مطلوب یخچال در ساعات روز و همچنین سرعت کمپرسور تعریف شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی بر روی یک مدل از یخچال در نرم‌افزار متلب نشان‌دهنده مصرف انرژی کمتر روش پیشنهادی در مقایسه با کنترل فازی بدون در نظر گرفتن زمان روز در تعیین قواعد فازی می‌باشد.

ترتیب ارائه مقاله به شرح زیر است: بخش ۲ به معرفی مقدماتی سیستم‌های فازی می‌پردازد. رفتار کاربر در باز کردن درب یخچال در بخش ۳ بررسی می‌شود. در بخش ۴ کنترل‌کننده فازی طراحی شده بیان می‌شود. بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی را ارائه می‌دهد. در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات در بخش ۶ ارائه می‌شوند.

### ۲- مقدماتی بر سیستم‌های فازی

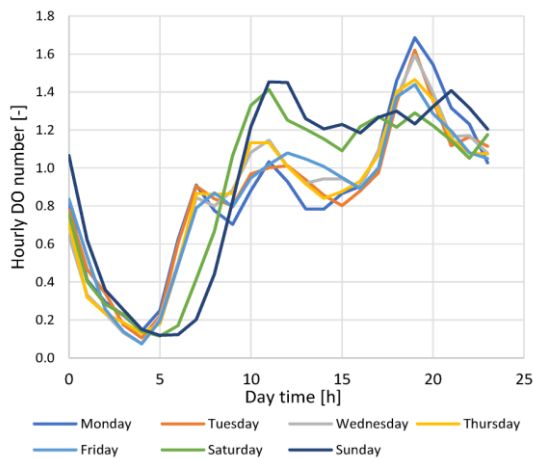
سیستم‌های فازی نوع یک دارای چهار بخش اصلی فازی‌ساز، موتور استنتاج، غیرفازی‌ساز و پایگاه قواعد فازی می‌باشند (شکل ۱).



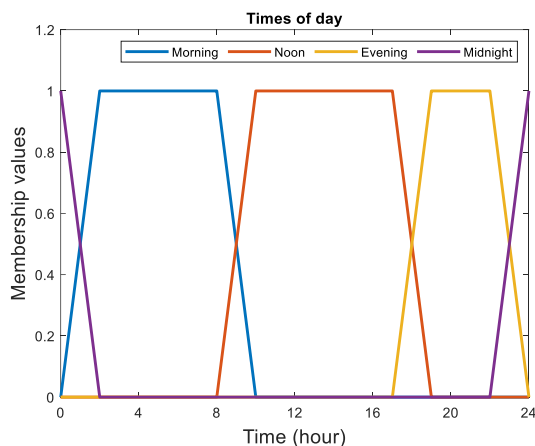
شکل ۱- ساختار یک سیستم فازی نوع یک [۲۸].

فازی‌ساز ورودی قطعی را دریافت می‌کند و بخش مقدم مجموعه‌های فازی را ایجاد می‌کند. پایگاه قواعد فازی، مجموعه قواعد فازی تعریف شده را دارد. موتور استنتاج با ترکیب قواعد فازی، نگاهی از توابع عضویت بخش مقدم به توابع عضویت بخش تالی ایجاد می‌کند. در نهایت

<sup>9</sup> Door Opening status



شکل ۳- متوسط بازکردن درب توسط ۱۸ گروه مشتری [۲۷]



شکل ۴- توابع عضویت مربوط به زمان‌های مختلف روز

#### ۴-۱- سیستم فازی دمای مطلوب یخچال

ابتدا یک سیستم فازی برای تعیین دمای مطلوب یخچال طراحی می‌شود. با توجه به میزان باز و بسته کردن درب و در نتیجه بازه زمانی روز قواعد فازی زیر ساخته شده‌اند:

۱- اگر زمان روز "صبح" است؛ آنگاه دمای مطلوب "خیلی گرم" باشد.

۲- اگر زمان روز "ظهر" است؛ آنگاه دمای مطلوب "سرد" باشد.

۳- اگر زمان روز "شب" است؛ آنگاه دمای مطلوب "خیلی سرد" باشد.

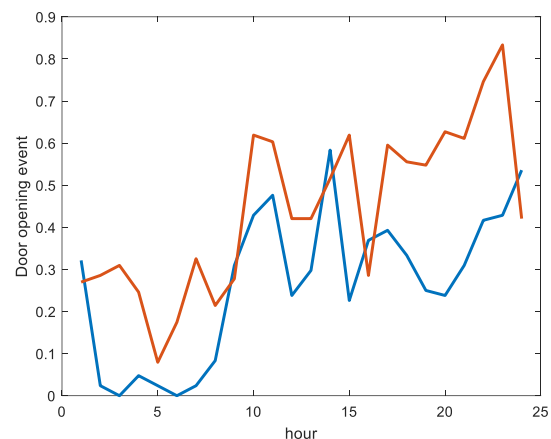
۴- اگر زمان روز "نیمه شب" است؛ آنگاه دمای مطلوب "گرم" باشد.

که "خیلی گرم"، "سرد"، "خیلی سرد" و "گرم" توابع عضویت فازی بخش تالی می‌باشند که در شکل (۵) نشان داده شده‌اند.

متوسط‌گیری بر روی ۱۸ مشتری بدست آمده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود؛ داده‌های جمع‌آوری شده شکل (۲) شباهت بسیاری به روند شکل (۳) دارد. مرجع [۲۷] از داده‌های جمع‌آوری شده از ساختارهای یادگیری ماشین جهت پیش‌بینی باز یا بسته بودن درب در یک ساعت بعدی استفاده می‌کند و به دقت ۸۰٪ در پیش‌بینی می‌رسد. نکته قابل توجه این است که در طول روز معمولاً درب حداقل یک بار در ساعت باز می‌شود و پیش‌بینی اینکه آیا درب باز شده خیلی منطقی به نظر نمی‌رسد. در نتیجه استفاده از شبکه عصبی جهت پیش‌بینی باز یا بسته بودن، بیشتر بار محاسباتی بالایی ایجاد می‌کند.

لذا در پژوهش حاضر، با توجه به داده‌های شکل (۲) و (۳)، روز به چهار بخش صبح، ظهر، شب<sup>۱۱</sup> و نیمه شب<sup>۱۲</sup> تقسیم می‌شود. در شکل (۴) توابع عضویت مربوطه نشان داده شده‌اند.

به عنوان نمونه تابع عضویت مربوط به نیمه شب از ساعت ۲۲ شروع و ساعت ۲ بامداد به اتمام می‌رسد. بیشترین مقدار تعلق این تابع عضویت ساعت ۲۴:۰۰ می‌باشد.



شکل ۲- داده‌های متوسط باز کردن درب برای دو گروه از مصرف‌کنندگان خانگی

#### ۴- سیستم‌های فازی پیشنهادی

در این بخش دو سیستم فازی برای تعیین دمای مطلوب یخچال ( $T_{set\_point}$ ) و کنترل سرعت کمپرسور ( $V_{comp}$ ) طراحی می‌شوند. از آنجایی که فریزر کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ همانند پژوهش‌های قبلی شامل مرجع [۲۷]، در اینجا نیز فقط بخش یخچال مورد توجه و بررسی قرار گرفته است.

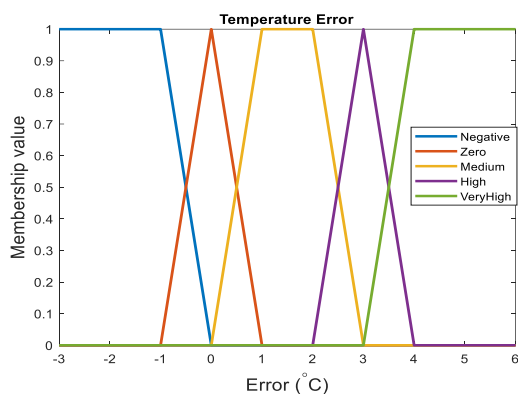
<sup>12</sup> Evening  
<sup>13</sup> Midnight

<sup>10</sup> Morning  
<sup>11</sup> Noon

۴- اگر زمان "صبح یا نیمه‌شب" باشد و خطا "زیاد" باشد؛  
انگاز سرعت "متوسط" باشد.

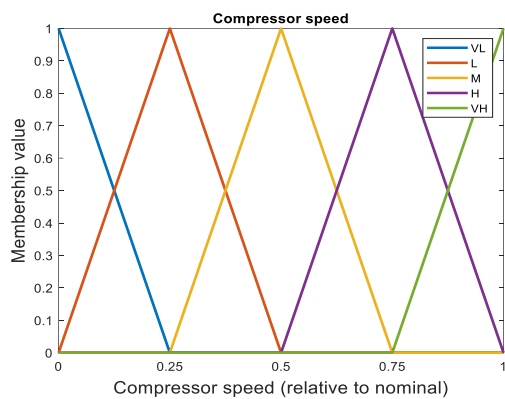
۵- اگر زمان "ظهر" باشد و خطا "زیاد" باشد؛ انگاز سرعت  
"زیاد" باشد.

۶- اگر زمان "شب" باشد و خطا "زیاد" باشد؛ انگاز سرعت  
"خیلی زیاد" باشد.

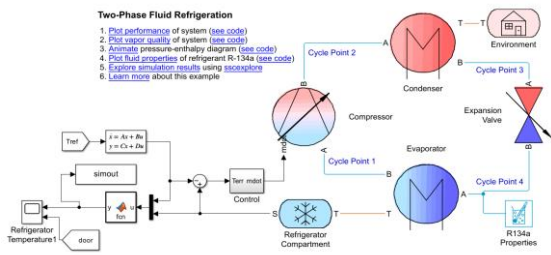


شکل ۶- توابع عضویت خطای دما

که در قواعد فازی بالا مجموعه‌های فازی سرعت کمپرسور در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. در نهایت خروجی سیستم فازی از غیرفازی‌ساز میانگین مراکز مطابق رابطه (۱) بدست می‌آید. سپس خروجی مربوطه با توجه به نزدیکی به هر یک از سطوح سرعت کمپرسور، به یکی از پنج سطح سرعت کمپرسور گسسته می‌شود.

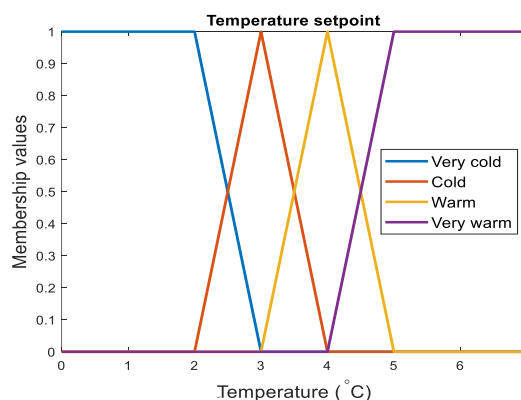


شکل ۷- توابع عضویت سرعت کمپرسور



شکل ۸- ساختار مدل تبرید ssc\_refrigeration متلب

با استفاده از فازی‌ساز منفرد و موتور استنتاج حاصلضرب، در نهایت خروجی سیستم فازی با غیرفازی‌ساز ماکزیمم به صورت رابطه (۲) محاسبه خواهد شد.



شکل ۵- توابع عضویت دمای مرجع

### ۴-۲- کنترل فازی کمپرسور

در این بخش یک سیستم فازی برای کنترل سرعت کمپرسور طراحی می‌گردد. عبارتی سرعت کمپرسور بر پایه زمان روز و خطای دما از مقدار مطلوب طراحی می‌شود. فرض شده است که کمپرسور دارای پنج سطح سرعت بین صفر تا یک به صورت  $[0, 0.25, 0.5, 0.75, 1]$  باشد. خطای دما به صورت اختلاف دمای داخل محفظه یخچال از مقدار مطلوب توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$e = T - T_{set\_point} \tag{۴}$$

که در آن  $T$  دمای داخل محفظه یخچال و  $T_{set\_point}$  دمای مطلوب داخل محفظه می‌باشد که از رابطه (۲) بدست می‌آید. توابع عضویت خطا به صورت خطای "منفی"، "صفر"، "متوسط"، "زیاد" و "خیلی زیاد" در شکل (۶) نشان داده شده‌اند.

قواعد فازی مربوطه با در نظر گرفتن میزان باز و بسته کردن درب در شبانه‌روز (شکل‌های ۱ و ۲) به صورت زیر تعریف شده‌اند:

- ۱- اگر خطا "منفی" باشد؛ انگاز سرعت "خیلی کم" باشد.
- ۲- اگر خطا "صفر" باشد؛ انگاز سرعت "کم" باشد.
- ۳- اگر خطا "خیلی زیاد" باشد؛ انگاز سرعت "خیلی زیاد" باشد.
- ۲- اگر زمان "صبح" باشد و خطا "متوسط" باشد؛ انگاز سرعت "کم" باشد.
- ۳- اگر زمان "صبح" نباشد و خطا "متوسط" باشد؛ انگاز سرعت "متوسط" باشد.

### ۵- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی محیط یخچال از مدل آماده سیمولینک متلب با نام *ssc\_refrigeration* استفاده شده است. این مثال یک سیکل تبرید فشرده‌سازی-بخار<sup>۱۴</sup> را با استفاده از اجزای سیال دو فاز<sup>۱۵</sup> مدل‌سازی می‌کند. اثر باز و بسته شدن درب بر اساس داده‌های واقعی در مدل اعمال شده است. فرض شده است که در هر بار باز و بسته کردن درب، درب به مدت ۶۰ ثانیه باز باشد. شکل (۸) ساختار سیستم را نشان می‌دهد.

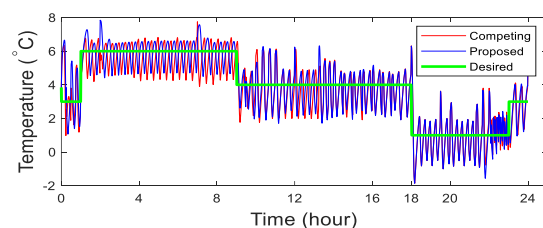
سیستم فازی کنترل دمای مرجع و کنترل کمپرسور در بخش *control* تعبیه شده است.

برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی معرفی شده بخش ۴، یک کنترل‌کننده فازی مرسوم در کنترل یخچال (مشابه مرجع [۱۳]) با در نظر گرفتن فقط خطای دما با قواعد زیر طراحی شده است:

- ۱- اگر خطا "منفی" باشد، آنگاه سرعت "خیلی کم" باشد.
- ۲- اگر خطا "صفر" باشد؛ آنگاه سرعت "کم" باشد.
- ۳- اگر خطا "متوسط" باشد؛ آنگاه سرعت "متوسط" باشد.
- ۴- اگر خطا "زیاد" باشد؛ آنگاه سرعت "زیاد" باشد.
- ۵- اگر خطا "خیلی زیاد" باشد؛ آنگاه سرعت "خیلی زیاد" باشد.

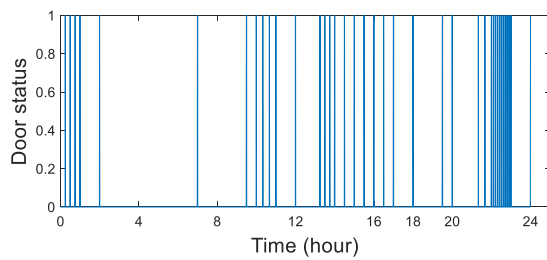
شکل (۹-الف) دمای محفظه یخچال را برای روش پیشنهادی بخش ۴ (با در نظر گرفتن زمان) و سیستم فازی مرسوم (بدون در نظر گرفتن زمان)، نشان می‌دهد. همچنین شکل (۹-ب) زمان‌های باز و بسته شدن درب را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود؛ در هنگام باز شدن درب افزایش دما را داشته‌ایم. برای مشاهده بهتر، بزرگنمایی شکل (۹) در بازه ساعت ۱۵:۰۰ تا ۱۶:۰۰ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود؛ در هنگام باز شدن درب افزایش دما داشته‌ایم.

توان مصرفی یخچال نیز برای هر دو روش در شکل (۱۱) نشان داده شده است که نشان دهنده مصرف توان کمتر توسط روش پیشنهادی می‌باشد.



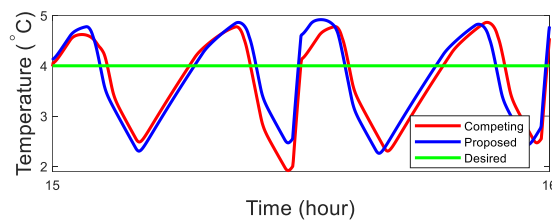
<sup>14</sup> Vapor-compression

الف

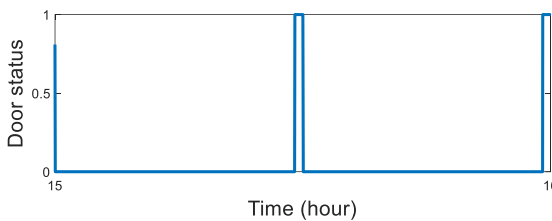


ب

شکل ۹-الف)- خروجی دما برای روش فازی مورد مقایسه و روش فازی پیشنهادی، ب) نشانگر باز شدن درب یخچال.

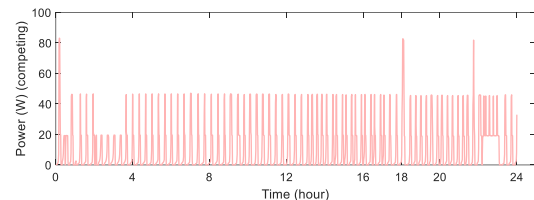


الف

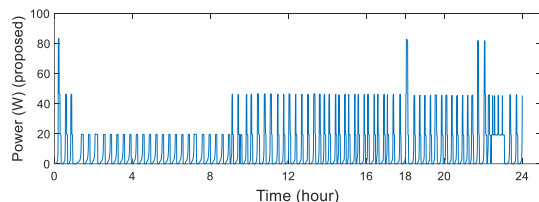


ب

شکل ۱۰- بزرگنمایی شکل ۹ در ساعت ۱۵ تا ۱۶.



الف



ب

شکل ۱۱- توان مصرفی یخچال برای الف) روش فازی مورد مقایسه و ب) روش فازی پیشنهادی.

برای ارزیابی بهتر نتایج میانگین مربعات خطا (MSE) و انرژی مصرفی متوسط در جدول ۱ آورده شده‌اند که نشان

<sup>15</sup> Two-phase fluid

پایاده شده است. در پژوهش‌های آینده پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی یک برد واقعی یخچال پیشنهاد می‌شود.

### تقدیر و تشکر:

پژوهش حاضر در دوره فرصت مطالعاتی در صنعت نویسنده اول در شرکت دانش بنیان تحقیقات صنعتی آفتابگردان تابان شرق انجام شده است. نویسنده اول مراتب تقدیر و تشکر خود را از مسئولین شرکت مذکور جهت فراهم نمودن بستر مناسب برای انجام پژوهش مورد نظر اعلام میدارد.

### تعارض منافع:

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد

### تاییدیه اخلاقی:

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

### مشارکت‌های نویسندگان:

**فهمیه باغبانی:** روش شناسی، نرم افزار، اعتبارسنجی، تحقیق، نگارش پیش نویس اصلی، بررسی و ویرایش  
**احمدرضا باقری:** روش شناسی، نرم افزار، اعتبارسنجی، تحقیق، نگارش پیش نویس اصلی، بررسی و ویرایش  
**نوید یکتای:** روش شناسی، اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش، منابع، راهنمایی

**منابع مالی:** در انجام پژوهش هیچ منابع مالی مورد استفاده قرار نگرفته است.

دهنده میزان مصرف انرژی کمتر (۰.۳٪) و MSE کمتر (۰.۵٪) برای سیستم فازی پیشنهادی هستند.

جدول ۱- میزان انرژی مصرفی متوسط و خطای ردیابی

خطا (°C)	انرژی مصرفی متوسط (W)	معیار / روش
۱.۱۸۳۲	۱۰.۳۰۸۴	روش فازی مورد مقایسه
۱.۱۲۴۵	۱۰.۰۷۵۷	روش فازی پیشنهادی

### ۶- نتیجه گیری

با توجه به تأثیر باز و بسته شدن درب یخچال توسط کاربر در مصرف انرژی، طراحی کنترل‌کننده مناسب با هدف کاهش مصرف انرژی به نحوی که رفتار کاربر نیز در آن لحاظ شده باشد؛ مورد توجه پژوهش حاضر است. به طور دقیق‌تر، در این پژوهش با بررسی رفتار کاربر در باز کردن درب یخچال، ساعات روز به چهار بخش صبح، ظهر، شب و نیمه شب تقسیم شده‌اند. سپس دمای مرجع یخچال با استفاده از یک سیستم فازی و با توجه به زمان روز تنظیم می‌شود. همچنین با توجه به زمان روز و خطای دما، سیستم فازی دیگری برای کنترل کمپرسور طراحی شده است. نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با یک کنترل‌کننده فازی ساده بدون در نظر گرفتن رفتار کاربر نشان دهنده خطای کمتر و انرژی مصرفی کمتر می‌باشد.

از معایب روش پیشنهادی، تنظیم آن بر اساس رفتار کاربران خانگی محدود می‌باشد. در نتیجه با تغییر کاربری یخچال نیاز به مطالعه دوباره رفتار کاربر و تنظیم دوباره سیستم فازی خواهیم داشت. همچنین روش به صورت شبیه‌سازی

### مراجع

- [1] J.L. Dupont, P. Domanski, P. Lebrun, and F. Ziegler. "The role of refrigeration in the global economy-38. Informatory Note on Refrigeration Technologies." (2019).
- [2] A.S. Silveira, G.A. Souza, R.J. Liston, E. Machado, and C.J. Hermes. "Sensorless temperature control of household refrigerators based on the electric current of the compressor." *International Journal of Refrigeration* 152 (2023): 171-175.
- [3] W.P. van der Vossen-Wijmenga, H.M. den Besten, and M.H. Zwietering. "Temperature status of domestic refrigerators and its effect on the risk of listeriosis from ready-to-eat (RTE) cooked meat products." *International Journal of Food Microbiology* 413 (2024): 110516.
- [4] R. Zhao, Z. Wang, D. Huang, W. Shen, H. Hu, and X. Tang. "Electric-heater defrosting performance of frost-free refrigerator-freezer and its improvement by step-reduction power." *Applied Thermal Engineering* 226 (2023): 120147.
- [5] Q.I. Ronghui, L.I. Tao, and L.Z. Zhang. "A new approach for air dehumidification at refrigerator temperatures: Electrolytic vapor dehumidifier with Proton Exchange Membrane (PEM)." *International Journal of Refrigeration* 118 (2020): 453-461.



- [6] I. Javeri-Shahreza, L. Abdolmaleki, S.M. Sadrameli, and M. Fakhroleslam. "Dynamic modeling and experimental validation of household refrigerators/freezers equipped with phase change materials towards improved energy efficiency." *Thermal Science and Engineering Progress* 46 (2023): 102227.
- [7] D.Y. Liu, W.R. Chang, and J.Y. Lin. "Performance comparison with effect of door opening on variable and fixed frequency refrigerators/freezers." *Applied Thermal Engineering* 24, no. 14-15 (2004): 2281-2292.
- [8] S. Gupta, S. Giri, T. Srivastava, P. Agarwal, R. Sharma, and A. Agrawal. "Smart refrigerator based on 'internet of things'." In *2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, pp. 436-439. IEEE, 2021.
- [9] S. Mundody, and R.M.R. Guddeti. "A framework for low cost, ubiquitous and interactive smart refrigerator." *Multimedia Tools and Applications* 83, no. 5 (2024): 13337-13368.
- [10] F. Baghbani. "Observer-based adaptive emotional controller for a class of uncertain nonlinear systems." *Journal of Modeling in Engineering* 21, no. 74 (2023): 37-49. (in Persian)
- [11] M.F. Savadkouhia, and M. Deypir. "Provide a method for recognizing trust in social networks according to individual and personal characteristics using a compatible neural-fuzzy inference system method." *Journal of Modeling in Engineering* 21 (2023): 115-127. (in Persian).
- [12] M. Radmehr, and H. Zarabadipour. "Fuzzy sliding mode control for tracking the optimal profile of train speed in the presence of uncertainty." *Journal of Modeling in Engineering* 20, no. 68 (2022): 139-152. (in Persian)
- [13] M. Mraz. "The design of intelligent control of a kitchen refrigerator." *Mathematics and Computers in Simulation* 56, no. 3 (2001): 259-267.
- [14] N.A. Baleghy. "Design and implementation fuzzy controller in the frost-free refrigerator by using multivariate regression." In *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)*, pp. 840-844. IEEE, 2012.
- [15] N.A. Baleghy. "Design and implementation fuzzy controller in the frost-free refrigerator by using multivariate regression." In *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)*, pp. 840-844. IEEE, 2012.
- [16] S.Q. Ain, M. Saifizi, S.M. Othman, A.A. Aziz, W.A. Mustafa, and W. Khairunizam. "Temperature Control Using Fuzzy Controller for Variable Speed Vapor Compression Refrigerator System." In *Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics*. 2022. doi: 10.5954/icarob.2022.os32-6.
- [17] Y.W. You, Z.G. Zhang, C.M. Guo, and L.L. Zhang. "Optimizing approach to varying load of the refrigeration system based on fuzzy logic control." *Advanced Materials Research* 433 (2012): 6896-6901.
- [18] S.K. Jeong, C.H. Han, L. Hua, and W.K. Wibowo. "Systematic design of membership functions for fuzzy logic control of variable speed refrigeration system." *Applied Thermal Engineering* 142 (2018): 303-310.
- [19] C. Aprea, R.I.T.A. Mastrullo, and C. Renno. "Fuzzy control of the compressor speed in a refrigeration plant." *International Journal of Refrigeration* 27, no. 6 (2004): 639-648.
- [20] L. Hua, and S.K. Jeong. "Design and analysis of fuzzy control in a variable speed refrigeration system." *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration* 15, no. 2 (2007): 61-69.
- [21] J. Singh, N. Singh, and J.K. Sharma. "Design of fuzzy system for vapour compression refrigeration system." *Journal of Scientific and Industrial Research (JSIR)* 65 (2006): 135-141.
- [22] J.P. Cao, S.K. Jeong, and Y.M. Jung. "Fuzzy logic controller design with unevenly-distributed membership function for high performance chamber cooling system." *Journal of Central South University* 21 (2014): 2684-2692.
- [23] D.A. Rodríguez-Valderrama, J.M. Belman-Flores, D. Hernández-Fusilier, D.M. Pardo-Cely, M.A. Gómez-Martínez, and S. Méndez-Díaz. "Implementation of fuzzy control in a domestic refrigerator considering the influence of the thermal load." *International Journal of Refrigeration* 149 (2023): 23-34.
- [24] J.M. Belman-Flores, D.A. Rodríguez-Valderrama, S. Ledesma, J.J. García-Pabón, D. Hernández, and D.M. Pardo-Cely. "A review on applications of fuzzy logic control for refrigeration systems." *Applied Sciences* 12, no. 3 (2022): 1302.
- [25] B.J. Choi, S.W. Han, and S.K. Hong. "Refrigerator temperature control using fuzzy logic and neural network." In *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Proceedings. ISIE'98 (Cat. No. 98TH8357), vol. 1, pp. 186-191. IEEE, 1998.

- [26] J.M. Belman-Flores, S. Ledesma, D.A. Rodríguez-Valderrama, and D. Hernández-Fusilier. "Energy optimization of a domestic refrigerator controlled by a fuzzy logic system using the status of the door." *International Journal of Refrigeration* 104 (2019): 1-8.
- [27] E. Kapici, E. Kutluay, and R. Izadi-Zamanabadi. "A novel intelligent control method for domestic refrigerators based on user behavior." *International Journal of Refrigeration* 136 (2022): 209-218.
- [28] J.M. Mendel. *Uncertain rule-based fuzzy systems: Introduction and new directions*, 2nd Edition. Springer, 2017.