

## سیستم چند عامله همکار فازی با سنسورهای مجازی برای مدیریت انرژی ساختمان در بخش سرمایشی

<sup>۱</sup> لعلیا کشفی\*، <sup>۲</sup> محمدرضا اکبرزاده توتونچی، <sup>۳</sup> محمدحسین یغمایی مقدم

### چکیده

طراحی سیستم مدیریت انرژی هوشمند ساختمان (BIEMS) در بخش تهویه مطبوع، برای ساختمان‌هایی وسیع با موتورخانه‌های بزرگ و ورودی‌های پراکنده یک مسئله چند هدفه و پیچیده است که باید همزمان حفظ پایداری سیستم، تطبیق با شرایط متغیر با زمان، کاهش اتلاف انرژی و حفظ کیفیت مناسب هوا تامین نماید. بنابراین برای دستیابی به این اهداف متقابل در این ساختمان‌ها، به‌کارگیری رویکرد کنترلی توزیع شده مناسب است. در این مقاله، یک سیستم مدیریت ساختمان چند عامله همکار (CMA BMS) مجهز به کنترلرهای فازی و حسگرهای مجازی پیشنهاد می‌نماییم که هر یک از عامل‌ها کنترل یکی از اجزای اصلی موتورخانه سرمایشی را در بخش مدار اولیه HVAC برعهده دارند و برخلاف کارهای گذشته، توپولوژی آنها افقی است و هر عامل مستقل و موازی عمل می‌کند که منجر به عملکرد سریعتر، تشخیص خطای راحت‌تر و توسعه پذیری بیشتر می‌گردد. برای مدلسازی از سنسورهای مجازی پیاده‌سازی شده با شبکه‌های عصبی RBF بهره برده‌ایم که نقش پشتیبان سنسور واقعی را نیز دارند. برای ارزیابی طرح، دو BEMS با استراتژی‌های متمرکز مرسوم و پیشنهادی طراحی شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد طرح پیشنهادی پردازشگر و حافظه اصلی را کمتر مشغول نگه می‌دارد و همچنین کنترلرهای فازی در مصرف انرژی در مقابل کنترلرهای خطی عملکرد بهتری دارند.

### تاریخ دریافت:

۱۳۹۸ / ۳ / ۲۲

### تاریخ پذیرش:

۱۳۹۸ / ۱۲ / ۲۰

### کلمات کلیدی:

سیستم مدیریت انرژی  
ساختمان،  
سیستم چند عامله همکار،  
کنترل فازی،  
شبکه هوشمند برق،  
سنسور نرم،  
شبکه عصبی.

lkashfi@gmail.com  
akbazar@um.ac.ir  
yaghmaee@um.ac.ir

۱. کارشناس ارشد مهندسی کامپیوتر گرایش نرم افزار (نویسنده مسئول)  
۲. استاد تمام دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد  
۳. استاد تمام دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

## ۱. مقدمه

### ۱-۱. تعریف مسئله

هم اکنون بازار BEMS<sup>۱</sup>، شاهد سریع‌ترین رشد و امیدبخش‌ترین امواج نوآوری در صنعت ساخت‌وساز است. عواملی مانند افزایش دانش و گسترش کنترل دیجیتال در صنعت ساختمان، تمرکز بر بهره‌وری انرژی در میان شرکت‌ها و دولت‌ها و ظهور مدیریت داده‌ها مبتنی بر ابر<sup>۲</sup> و داده‌های عظیم<sup>۳</sup> از دلایل پشت پرده توسعه انفجاری بازار BEMS هستند [۲۸]. با توجه به تجزیه و تحلیل بازار جهانی پیش‌بینی می‌شود که بازار سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند و یا خودکار، در سال ۲۰۲۰ بیش از یک بیلیون دلار ارزش خواهد داشت. باید توجه داشت که هسته بازار BEMS، نرم‌افزار است و در بر گیرنده ۵۲ درصد درآمد حاصله است. حفظ تمایز و موفقیت در بازار BEMS مستلزم سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از فن‌آوری‌های نوین و دانش روز، هم در استراتژی‌های طراحی و هم در پیاده‌سازی و روش اجرا است [۲۹][۲۱]. سیستم‌های مدیریت انرژی ساختمان سنتی که تاکنون متداول بوده‌اند، فاقد ورودی‌های بلادرنگ و عوامل دینامیک مثل رفتار، تصمیمات و اولویت‌های ساکنین ساختمان و ویژگی‌های متغیر محیطی هستند. حتی با افزودن این اطلاعات به آنها، این سیستم‌ها هنوز نقص کمبود استنتاج هوشمند جهت رسیدگی به ورودی‌های متعدد، توزیع شده و دینامیک را دارند [۱۸]. با توجه به اینکه گرمایش، سرمایش و تهویه هوا منبع اصلی مصرف انرژی در ساختمان‌ها هستند و در برخی از کشورها حدود ۵۰ درصد مصرف انرژی ساختمان را تشکیل می‌دهند [۲۱][۱۵][۱۱]، محققان شروع به طراحی سیستم‌ها و کنترل‌کننده‌های هوشمندی نموده‌اند که توان مصرفی بخش سیستم تهویه مطبوع (HVAC)<sup>۴</sup> را به نحو کارآمدی مدیریت کند و استفاده از حسگرها و ترموستات‌های هوشمند را در سیستم گرمایش و تهویه‌هوا آزمایش کرده‌اند. باید توجه داشت که انتخاب یک سیستم تهویه مطبوع اقتصادی و مناسب بین

- 
1. Building Energy Management System
  2. Cloud-based
  3. Big data
  4. Heating, Ventilation, and Air Conditioning

گزینه‌های بسیار زیاد، یکی از مهمترین مسائلی است که مهندسان معمولاً با آن روبرو هستند. یک سیستم تهویه مطبوع که در هزینه‌های عملیاتی صرفه‌جویی می‌کند معمولاً به سرمایه‌گذاری اولیه بالاتری نیاز دارد. از این رو مهندسان باید تصمیم‌گیری کنند که آیا پرداخت هزینه اولیه اضافی برای سیستمی که هزینه‌های عملیاتی پایینتری دارد، ارزش است یا خیر [۱].

اهداف زیر سیستم مدیریت انرژی HVAC عبارتند از: سطح راحتی بالا، صرفه‌جویی در انرژی و کنترل کیفیت هوا. این اهداف در بسیاری از شرایط در تقابل با یکدیگرند. بنابراین مسئله کنترل بهینه HVAC، خود به تنهایی یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه و چند متغیره است. به ویژه برای ساختمان‌های بزرگی مثل ادارات و ساختمان‌های تجاری که شامل موتورخانه‌های عظیم و تجهیزات متعدد هستند، این مسئله بچرخ‌تر و پیچیده‌تر است [۴][۲]. از این رو با توجه به پیچیدگی مسئله و تعدد ورودی و خروجی‌ها در این گونه محیط‌ها برای دستیابی به اهداف مذکور در بخش HVAC، باید رویکرد توزیع‌شده و هوشمند برای طراحی BIEMS<sup>۱</sup> در نظر داشت تا هم بتوانیم اطلاعات پراکنده و مختلف حسگرها و عملگرهای متعدد را کنترل نماییم و هم بتوانیم همزمان به چالش‌های مرتبط به این اهداف متضاد رسیدگی کنیم [۲۵][۷][۲۳].

در این مقاله یک رویکرد واقع‌گرایانه و مبتنی بر هوش توزیع‌شده برای طراحی BIEMS ارائه کردیم که کنترل سه مؤلفه اصلی از موتورخانه HVAC در بخش مدار اولیه شامل چیلر، دیگ بخار و برج خنک‌کننده را در بر می‌گیرد، در حالی که تحقیقات دیگر عمدتاً در بخش مدار ثانویه و داخل ساختمان انجام شده است و در موارد مشابه فقط یک مؤلفه از بخش مدار اولیه در کنار اجزای موجود در بخش مدار ثانویه در نظر گرفته شده است و پیچیدگی کارکرد همزمان چند مؤلفه مدار اولیه را پوشش نمی‌دهند. در این طرح برای کنترل هر کدام از مؤلفه‌ها، از عامل هوشمند استفاده شده است که استقلال و خودمختاری خود را دارد که جهت انسجام سیستم و ارتقاء هوشمندی با یکدیگر همکاری می‌کنند و تبادل پیام می‌کنند که منجر به تصمیم‌گیری توزیع‌شده می‌گردد. این عامل‌ها دارای توپولوژی افقی هستند و وظایف اصلی بین این چندین عامل همکار تقسیم شده است. در حالی که سایر طرح‌های مشابه که برای MAS BMS ارائه شده‌اند، توپولوژی سیستم معرفی شده عمودی و سلسله‌مراتبی است و

1. Building Intelligence Energy Management System

عمدتاً یک عامل کار اصلی سیستم را انجام می‌دهد و عامل‌های دیگر یا مسئولیت مدیریت حسگرها را به عهده دارند و یا نقش عامل‌های واسط را دارند. توپولوژی افقی منجر به عملکرد سریعتر و کشف و رفع خطا ساده تر و توسعه پذیری بیشتر می‌گردد. کنترلر شیر بخار در عامل چیلر و کنترلر مشعل دیگ در عامل دیگ بخار به صورت فازی طراحی و معرفی شده‌اند. الگوریتم‌های کنترلی نیز بصورت مختصر در این مقاله گزارش می‌شوند که در طراحی الگوریتم‌های کنترلی هر سه مؤلفه چیلر، دیگ بخار و برج خنک‌کننده فیدبک‌های مرسوم و لازم و نقاط مهم زمان‌بندی و نظارتی BEMS گنجانده شدند. مفهوم تسهیم بار<sup>۱</sup> در طراحی الگوریتم کنترل توالی چند چیلر به کار گرفته شده است. اما به دلیل محدودیت‌های نگارشی از ارائه کامل الگوریتم‌ها خودداری می‌شود. به منظور جبران عدم دسترسی به حسگر سخت افزاری و تکمیل مدل‌سازی و پیچیده بودن مدل، از مفهوم حسگر مجازی یا حسگر نرم بهره بردیم و برای پیاده‌سازی آنها از شبکه‌های عصبی با تابع پایه شعاعی (RBF)<sup>۲</sup> استفاده کردیم که توسط نمودارهای عملکردی و معتبر مؤلفه‌های مرتبط آموزش دیده‌اند. در این مقاله نتایج آزمایشات در فصل تابستان و برای بخش سرمایشی ارائه می‌گردد اما این طرح بخوبی قابلیت تعمیم برای بخش گرمایشی و فصل‌های سرد سال نیز را دارد و همچنین بخاطر ساختار توزیع شده و توپولوژی افقی طرح براحتی می‌توان اجزای دیگر بخش‌های سیستم تهویه مطبوع را به این طرح اضافه نمود و با اضافه کردن و توسعه دادن مؤلفه‌های بیشتر هوش مصنوعی، سطح هوشمندی را ارتقاء داد.

مبتنی بر طرح پیشنهادی و موضوع پایان نامه ارشد تاکنون سه مقاله به صورت گام به گام ارائه شده است: الف) مقاله با عنوان "سیستم چند عامله همکار مجهز به کنترلر فازی شیر بخار برای مدیریت انرژی سیستم سرمایشی جذبی" ارائه شده در چهارمین کنگره مشترک سیستم‌های فازی و هوشمند ایران در ۱۸ تا ۲۰ شهریور ماه ۱۳۹۴ زاهدان دانشگاه سیستان و بلوچستان. در این مقاله طرح سیستم چندعامله و کنترلر فازی شیر بخار به صورت مختصر گزارش شده است و در مورد سایر بخش‌ها توضیحی ارائه نشده است.

- 
1. Load sharing
  2. Radial Basis Function

ب) مقاله با عنوان "سیستم چند عامله همکار مجهز به حسگر نرم برای مدیریت انرژی ساختمان" ارائه شده در کنگره بین‌المللی فن‌آوری، ارتباطات و دانش در ۲۰ و ۲۱ آبان‌ماه ۱۳۹۴ مشهد دانشگاه آزاد اسلامی مشهد. در این مقاله به توضیح ساختار عامل‌ها و حسگرهای مجازی پرداختیم و به دلیل محدودیت‌های نگارشی، از تشریح الگوریتم‌ها و کنترلرها خودداری نمودیم.

ج) مقاله با عنوان "سیستم چند عامله همکار مجهز به کنترلر فازی و سنسورهای مجازی برای سیستم مدیریت انرژی ساختمان در بخش سیستم سرمایشی" ارائه شده در اولین کنگره بین‌المللی نوآوری در مهندسی و توسعه تکنولوژی در ۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۵ تبریز دانشگاه تبریز. در مقاله مذکور ویژگی‌های مورد مطالعاتی، ساختار عامل‌ها و کنترلر فازی شیر بخار و ساختار حسگرهای نرم به صورت مختصر گزارش شدند، اما حاوی بخش پیام‌های بین عامل‌های هوشمند یا کنترلر فازی دیگ بخار و یا الگوریتم‌های کنترل کننده نیست.

لذا مقاله فعلی از سه مقاله قبلی کامل‌تر است و شامل بخش‌های بیشتری از طرح پیشنهادی و مباحث و نتایج پژوهشی استخراج شده از پایان نامه ارشد است.

این مقاله در پنج بخش تنظیم شده است: در بخش اول بعد از مقدمه به مرور اجمالی پژوهش‌های مرتبط به مدیریت انرژی ساختمان و سیستم تهویه مطبوع می‌پردازیم. بخش دوم به تعریف طرح پیشنهادی اختصاص دارد. در این بخش استراتژی پیشنهادی و الگوریتم‌های کنترلی را توضیح می‌دهیم. در بخش سوم نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند در بخش چهارم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای کارهای آتی را ارائه می‌کنیم. در بخش پنجم برخی اشخاص که در این طرح به ما کمک و راهنمایی ارائه کردند را معرفی نموده و از آنها تشکر کردیم.

## ۲-۱. مروری بر روش‌های کنترل سیستم تهویه مطبوع و مدیریت انرژی ساختمان

به منظور ارتقاء سطح انرژی ساختمان‌ها، استفاده مناسب از استراتژی‌های کنترل پیشرفته در سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع (HVAC) دارای اهمیت است [۳].

به‌طور کلی رویکردهای مختلف سیستم‌های کنترلی برای محیط‌های داخل ساختمان‌ها، به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف) روش‌های مرسوم ب) تکنیک‌های هوش محاسباتی ( $CI^1$ ) ج) سیستم‌های کنترلی هوشمند مبتنی بر عامل. با این حال، باید توجه داشت که همپوشانی بین این دسته‌ها غیر قابل اجتناب است. سیستم‌های کنترل انرژی کلاسیک به ترتیب توسعه ایی که به مرور زمان جهت برطرف نمودن نیازها پیدا کردند، عبارتند از: ۱. ترموستات‌ها ۲. کنترل‌کننده‌های  $PID^2$  ۳. کنترل‌کننده‌های تطبیقی و پیشگویانه. اما این تکنیک‌های مرسوم و بهینه همیشه راه‌حل‌های امکان‌پذیر و عملی نیستند و از اشکالات مختلف رنج می‌برند که برخی از آنها عبارتند از:

الف) نیاز به یک مدل از ساختمان.

ب) استفاده از عناصر معماری زیست اقلیمی، فرآیند مینیمم سازی تابع هزینه را بفرنج می‌سازد.

ج) نیاز به برآورد پارامتر در زمان واقعی، الگوریتم‌های مورد استفاده را به نوبز حساس می‌کند.

د) این تکنیک‌ها به مسئله آسایش ساکنین رسیدگی نمی‌کنند.

ه) سیستم‌های کنترلی منتج شده کاربرپسند نیستند.

و) این متدهای کنترلی از روش‌های یادگیری استفاده نمی‌کنند.

ز) روش‌های کنترل کلاسیک حداکثر حفاظت از انرژی را دارند اما به روش‌های کنش‌پذیر اولویت نمی‌دهند [۷].

راه حل بعدی هوش محاسباتی است. همکاری تکنولوژی شبکه‌های عصبی، منطق فازی و الگوریتم‌های تکاملی منجر به هوش محاسباتی می‌شود، که در حال حاضر به‌کارگیری آن در ساختمان آغاز شده است [۲۲]. تکنیک‌های هوش مصنوعی ( $AI^3$ ) برای کنترل هر دو نوع ساختمان‌های معمولی و زیست اقلیمی و نیز کنترل مؤلفه‌های سیستم تهویه مطبوع به کار می‌روند [۲۰][۲۴][۱۹][۱۳][۲۶]. البته به منظور کنترل محیط، محققان رویکردهای مختلفی را دنبال کردند؛ به عنوان مثال، شبکه‌های عصبی مبتنی بر تئوری مرسوم یادگیری مکانیکی. این رویکردها از توابع هدف استفاده می‌کردند که کمک می‌نمود نیازهای کاربران در سطح متوسطی برآورده شود و یا بهینه‌سازی بین نیازهای متضاد (مثل

- 
1. Computational Intelligence
  2. Proportional Integral Derivative
  3. Artificial Intelligence

بهره‌وری انرژی و آسایش کاربران) صورت بگیرد. با این حال، در هر دو مورد، کاربران مشارکت محدودی در بهره‌برداری از سیستم داشتند و باید تا حدی متحمل عدم آسایش می‌شدند.

یک راه حل برای این مشکل ترکیب سیستم‌های مبتنی بر رفتار با سیستم‌های مبتنی بر هوش محاسباتی است. مزیت اصلی این سیستم‌ها این است که آنها یک مدل تئوری را با یک مدل واقعی جایگزین می‌کنند. سیستم رفتاری یک کنترل‌کننده فازی است که در آن از یک الگوریتم تکاملی مثل الگوریتم ژنتیک برای تنظیم توابع عضویت استفاده شده است.

اما سیستم‌های کنترلی که با استفاده از تکنیک‌های کلاسیک AI توسعه یافته‌اند نیز با اینکه خودکار هستند، مستقل نیستند. بنابراین به منظور مجهز نمودن ساختمان‌ها به سطح هوشمندی بالاتر، تکنیک‌ها و متدولوژی‌هایی که برای سیستم‌های خودمختار هوشمند توسعه یافته‌اند، به کار گرفته شده‌اند مانند سیستم‌های چندعامله هوشمند<sup>۱</sup> [۶][۱۲]. عامل هوشمند برای حل مسایل از تکنیک‌های هوش مصنوعی توزیع شده استفاده می‌کند. استقلال، توزیع و باز بودن برخی از ویژگی‌های مهمی است که سیستم‌های چندعامله هوشمند برای بهبود و پیشرفت معماری فعلی سیستم مدیریت انرژی ساختمان ارائه می‌دهند. در مسائل توزیع شده مانند بهینه‌سازی انرژی در فضاهای گسترده، معماری چند عامل می‌تواند به نحوی پیاده‌سازی شود که تمام فرایندها به روشی شهودی‌تر و با هزینه نگهداری کمتر مدیریت شوند [۱۰].

### ۳-۱. مروری بر کاربرد حسگر نرم

حسگر نرم<sup>۲</sup> یا حسگر مجازی<sup>۳</sup> برنامه نرم افزاری است که مدل پیش‌بینی کننده براساس داده‌های استخراج شده از مورد مطالعاتی ایجاد می‌کند. در یک سطح بسیار کلی، می‌توان دو دسته متمایز برای حسگر نرم قائل شد: حسگر نرم مدل محور و حسگر نرم داده محور. حسگرهای داده محور، مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده در پردازش طرح‌های صنعتی هستند و در مقایسه با حسگر نرم مدل محور، واقعیت مربوط به شرایط یک فرآیند را با روش بهتری نشان می‌دهند.

1. Intelligent multi agent systems
2. Soft sensor
3. Virtual sensor

طیف وظایفی که حسگر نرم می‌تواند انجام دهد، گسترده است که به‌طور کلی شامل سه دسته هستند: الف) پیش‌بینی آنالین متغیرهای فرآیند. از آنجا که این متغیرها معمولاً به کیفیت خروجی فرآیند مربوط می‌شوند، برای مدیریت و کنترل فرآیند بسیار حائز اهمیت هستند. به همین دلیل، نقش حسگر نرم برای ارائه اطلاعات اضافی درباره این متغیرها در نرخ نمونه برداری بالاتر و با هزینه اقتصادی کمتر، بسیار چشمگیر است. در حال حاضر تکنیک‌های مدل‌سازی به‌کار برده شده برای این نوع از کاربردها، روش‌های آماری و یا رویکردهای یادگیری نظارتی در حوزه محاسبات نرم هستند.

ب) نظارت بر فرآیند و تشخیص خرابی فرآیند، این وظایف مربوط می‌شود به تشخیص حالت فرآیند و انحراف از شرایط عادی برای شناسایی منبع خطا. نقش حسگر نرم در نظارت بر فرآیند، ایجاد ویژگی‌های چند متغیره مربوط به تشریح حالت فرآیند و مبتنی بر داده‌های تاریخی است.

ج) تشخیص خرابی و بازسازی حسگر فیزیکی. در حال حاضر واحدهای صنعتی مجهز به تعداد زیادی از حسگرهای مختلف هستند، بنابراین احتمال زیادی وجود دارد که یک حسگر گه‌گاهی خراب شود. هنگامی که توسط حسگر نرم، یک حسگر فیزیکی معیوب تشخیص داده می‌شود، می‌توان آن را یا بازسازی کرد و یا حسگر معیوب را با یک حسگر نرم دیگر که برای پشتیبانی از حسگر سخت افزاری آموزش دیده، جایگزین نمود [۱۶][۱۷][۱۸][۱۹][۱۴].

## ۲. طرح پیشنهادی

### ۲-۱. معماری و مؤلفه‌ها

رویکرد پیشنهادی مبتنی بر یک سیستم چند عامله همکاری کننده است که از سه نوع عامل تشکیل شده است که عبارتند از عامل چیلر، عامل برج خنک‌کننده و عامل دیگ بخار. این طرح مبتنی بر استراتژی توزیع شده است و شامل دو لایه اصلی و پیرو است که عامل‌ها برای ارتباط با یکدیگر در داخل یک لایه یا در لایه دیگر، از ارسال پیام استفاده می‌کنند. لایه اصلی حاوی عامل چیلر اصلی است که همواره فعال بوده و مشغول به کار است مگر اینکه دچار نقص عملکرد شود و یا چیلر مرتبط به آن دچار اشکال فنی شود. مشخص است که در کنار یک چیلر اصلی یک برج خنک‌کننده و یک دیگ بخار هم مشغول به کار خواهند بود تا نیازهای مرتبط به چیلر را فراهم کنند. بنابراین در این لایه سه عامل فعال هستند و در مواقع لزوم به یکدیگر پیام ارسال می‌کنند. در این لایه هیچ عاملی بر عامل دیگری برتری

ندارند و هر عامل به‌طور مستقل عمل کرده، وظایف و ورودی‌ها و خروجی‌ها خود را تحت مدیریت دارد. هر سه عامل موازی عمل می‌کنند.

لایه فرعی حاوی دو عامل چیلر کمکی و دو عامل برج و دو عامل دیگ بخار متناظر آنها است. بنابراین این لایه شامل ۶ عامل است که با افزایش و یا کاهش بار سرمایه‌ی ساختمان‌ها و با توجه به الگوریتم توالی کنترل چیلرها، فعال شده و وارد مدار سیستم می‌شوند و یا از مدار سیستم خارج شده و غیر فعال می‌گردند. این عامل‌ها هم وقتی فعال شدند به صورت موازی و مستقل با سه عامل لایه اصلی وظایف خود را انجام می‌دهند. به این معنی که توپولوژی این طرح افقی است که در این زمینه با سایر طرح‌های مشابه تفاوت دارد.

هر عامل چیلر شامل سه کنترل کننده است که عبارتند از:

الف) کنترل کننده عیب و خطا: این کنترلر در بازه‌های زمانی مشخصی وضعیت‌های اجرا و خطای عملکرد چیلر را بررسی می‌کند و در صورت وجود مشکل، پیام هشدار صادر می‌کند.

ب) کنترل کننده خاموش/روشن: این کنترلر شرایط راه‌اندازی چیلر را بررسی می‌کند و فرمان روشن شدن چیلر را صادر می‌نماید و طبق الگوریتم توالی چیلر، در زمان لازم، فرمان خاموش شدن چیلر را می‌دهد. الگوریتم توالی چیلر در دست عامل چیلر اصلی است که همیشه در مدار سیستم فعال بوده و در حال کار است. این الگوریتم مشخص می‌کند در ساعات مختلف روز، برحسب بار سرمایه‌ی مورد نیاز ساختمان‌ها، چند چیلر در مدار سیستم سرمایه‌ی مشغول به کار باشند.

ج) کنترل کننده شیر بخار: وظیفه آن این است که میزان باز/بسته بودن شیر بخار ورودی به چیلر را، با توجه به دمای آب خروجی از اواپراتور چیلر و دمای آب ورودی به کندانسور چیلر تنظیم کند. با تنظیم مناسب شیر بخار، شرایط بهبود کارایی چیلر تا حد مطلوبی فراهم می‌گردد.

عامل برج خنک کننده شامل چهار کنترل کننده است که عبارتند از:

الف) کنترل کننده عیب و خطا: این کنترلر در بازه‌های زمانی مشخصی وضعیت‌های اجرا و خطای عملکرد برج خنک کننده را بررسی می‌کند و در صورت وجود مشکل، پیام هشدار صادر می‌کند. اپراتور انسانی پس از مشاهده و دریافت پیام‌های هشدار باید مشکلات سخت افزاری موجود را بررسی کند تا علت نقص عملکرد کنتاکتور و یا دلیل تریپ فن برج خنک کننده را بیابد و برطرف کند.

ب) کنترل کننده خاموش/روشن فن: این کنترلر طبق الگوریتم راه اندازی برج، پس از بررسی شرایط برج خنک کننده را روشن می سازد و با توجه به دمای آب ورودی و خروجی برج خنک کننده، دمای مرطوب محیط بیرون و کمترین دمای مجاز آب ورودی به کندانسور چیلر، فن برج را روشن و یا خاموش می کند. در عامل های برج خنک کننده غیر اصلی در مواقع لزوم، کنترلر مذکور، فرمان خاموش شدن به برج متناظرش ارسال می کند.

ج) کنترل کننده میزان سرعت فن: این کنترلر فیدبک سرعت فن را جهت مانیتورینگ دریافت می کند و همچنین با استفاده از الگوریتم کنترل سرعت فن و با توجه به مقادیر ورودی دمای آب ورودی و خروجی برج خنک کننده، دمای مرطوب محیط بیرون و کمترین دمای مجاز آب ورودی به کندانسور چیلر، سرعت فن را تنظیم می کند. در مورد مطالعاتی، برج های خنک کننده از نوع دو سرعت هستند. بنابراین این کنترلر، چرخش فن را یا با سرعت کم و یا با سرعت زیاد میزان می کند.

د) کنترل کننده شیر کنار گذر و پمپ اضطراری: این کنترلر با توجه به مقادیر فلو سویچ های سطح تشتک آب برج خنک کننده، اگر آب از حد مجاز سرریز کرده باشد، فرمان باز شدن شیر کنار گذر آب را صادر می کند تا آب اضافی از برج خارج شود. چنانچه آب تشتک از حد مجاز سطح پایین کمتر بود، کنترلر فرمان روشن شدن پمپ آب اضطراری را می دهد تا کمبود آب در تشتک برج جبران گردد.

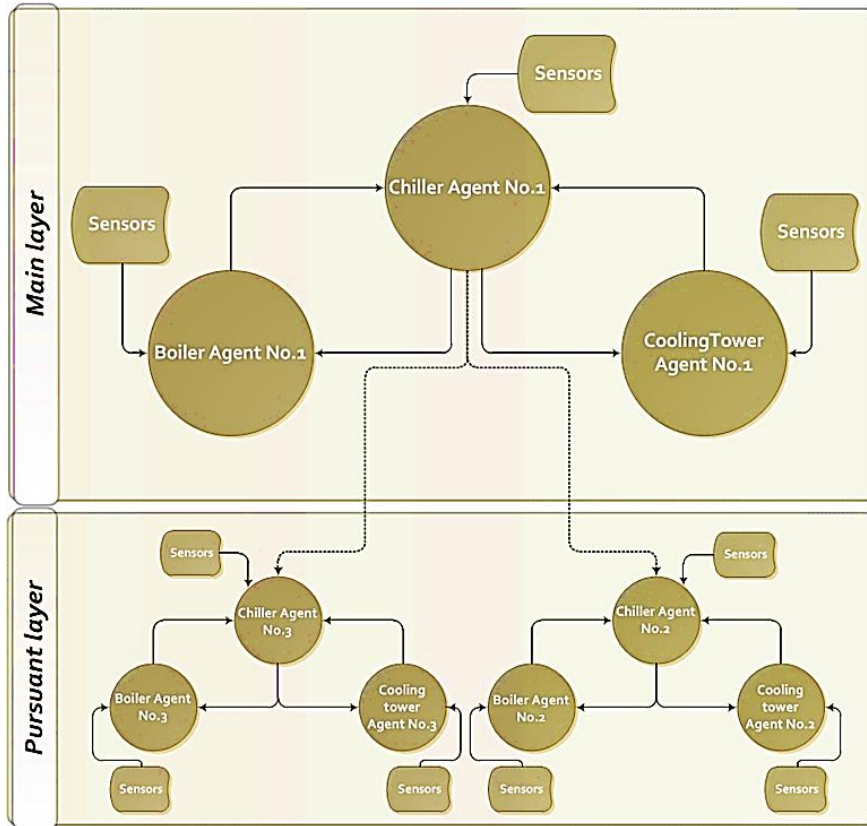
هر عامل دیگ بخار شامل سه کنترل کننده است:

الف) کنترل کننده عیب و خطا: این کنترلر در بازه های زمانی مشخصی وضعیت های اجرا و خطای عملکرد دیگ بخار را بررسی می کند و در صورت وجود مشکل، پیام هشدار صادر می کند. اپراتور انسانی با دریافت پیام های هشدار، باید مشکلات سخت افزاری موجود را بررسی کند تا علت نقص مدار کنتاکتور و یا دلیل خطای عملکرد دیگ بخار را بیابد و برطرف کند.

ب) کنترل کننده خاموش/روشن بویلر: این کنترلر ابتدا شرایط راه اندازی بویلر را بررسی می کند و سپس فرمان روشن شدن بویلر را صادر می نماید. در عامل های بویلر غیر اصلی در مواقع لزوم، کنترلر مذکور، فرمان خاموش شدن به بویلر تحت کنترل خود را ارسال می کند.

ج) کنترل کننده میزان مشعل بویلر: با توجه به ماهیت تدریجی کنترل مشعل دیگ بخار، این کنترلر به صورت فازی طراحی شده است. وظیفه آن این است که مشعل بویلر را، با توجه به دمای بخار خروجی

از دیگ تنظیم کند. این کنترلر پیام هشدار از طرف چیلر را نیز مد نظر قرار می‌دهد تا بخار مورد نیاز آنرا با دمای مناسب و در اسرع وقت فراهم کند و در این مورد با چیلر هماهنگ باشد. در شکل ۱ استراتژی توزیع شده به همراه لایه‌های آن و ارتباطات بین عامل‌ها ترسیم شده است.



شکل ۱. استراتژی توزیع شده (طرح پیشنهادی) و شامل لایه اصلی<sup>۱</sup> و لایه پیرو<sup>۲</sup>

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در این رویکرد پیشنهادی که از یک سیستم چند عامله (MAS) استفاده شده است، عامل‌ها جهت توزیع بهتر هوشمندی و حفظ هماهنگی و انسجام سیستم، با یکدیگر همکاری و مذاکره می‌کنند. ارتباط بین عامل‌ها از طریق ارسال پیام به یکدیگر انجام می‌گیرد. البته در طرح ما

1. Main Layer
2. Pursuant Layer

هدف این بوده است که تا جای ممکن تعداد پیام‌های ارسالی کم باشد، زیرا ارسال پیام می‌تواند موجب افزایش هزینه اجرای برنامه و اتلاف پردازشگر (CPU Waste) گردد. پیام‌های ارسالی چند نوع هستند که عبارتند از:

- پیام فعال‌سازی: عامل فرستنده فعال است و عامل دریافت‌کننده غیرفعال است و پس از دریافت پیام فعال می‌گردد.
- پیام غیر فعال‌سازی: هر دو عامل فرستنده و دریافت‌کننده فعال هستند و عامل گیرنده پس از دریافت پیام غیرفعال می‌گردد.
- پیام هشدار به عامل همکار: هر دو عامل فرستنده و دریافت‌کننده فعال هستند و عامل فرستنده به عامل گیرنده هشدار می‌دهد که خروجی آن مطلوب نیست
- پیام همگام‌سازی: هر دو عامل فرستنده و دریافت‌کننده فعال هستند و عامل فرستنده، عامل‌های گیرنده در موارد لازم با خود همگام و هماهنگ می‌سازد.
- پیام درخواست: هر دو عامل فرستنده و دریافت‌کننده فعال هستند و عامل فرستنده درخواست ارسال دیتای مدنظرش را به عامل گیرنده می‌دهد.
- پیام دیتا: هر دو عامل فرستنده و دریافت‌کننده فعال هستند و عامل فرستنده دیتا به عامل گیرنده ارسال می‌کند.
- پیام تصدیق: هر دو عامل فرستنده و دریافت‌کننده فعال هستند و عامل گیرنده پیام تصدیق دریافت پیام را به فرستنده می‌فرستد.

## ۲-۲. الگوریتم‌های کنترلی

الگوریتم‌های کنترلی با مشورت مهندسین مکانیک و متخصصین<sup>1</sup> BMS، طراحی شدند که عبارتند از الگوریتم راه‌اندازی چیلر، الگوریتم کنترل توالی چیلرها، الگوریتم راه‌اندازی و کنترل برج خنک‌کننده، الگوریتم راه‌اندازی و کنترل دیگ بخار.

### الگوریتم راه اندازی چیلر

این الگوریتم در ابتدا امکان فرمان از طریق BMS را بررسی می‌کند که در صورت مثبت بودن این مرحله، شرایط اولیه راه‌اندازی چیلر را بررسی می‌نماید و پس از تایید شرایط، چیلر را روشن می‌سازد. سپس فیدبک‌های وضعیت اجرا و خطا را در گام‌های زمانی با فاصله کم، دریافت می‌کند تا بتوان از عملکرد صحیح چیلر مطمئن شد.

### الگوریتم توالی چیلرها

این الگوریتم طبق جدول دبی آب و متناسب با بار سرمایش ساختمان‌ها، تصمیم می‌گیرد که چند چیلر در مدار فعال باشند و به‌طور موازی کار کنند. با توجه به اینکه در موتورخانه مورد مطالعاتی سه چیلر داریم، الگوریتم به این نحو عمل می‌کند که در شرایط بار سرمایشی کم و متوسط، یک چیلر در مدار فعال است، در شرایط بار سرمایشی زیاد دو چیلر به‌طور موازی کار می‌کنند و در شرایط بار سرمایشی بسیار زیاد و بحرانی هر سه چیلر موازی عمل می‌کنند. در هر وضعیت کنترلر فازی شیر بخار، بخار ورودی به ژنراتور چیلر را به نحوی تنظیم می‌نماید که دمای آب خروجی از اواپراتور چیلر برابر  $7^{\circ}\text{C}$  شود. در شرایط بحرانی، سه چیلر نمی‌توانند پاسخگوی بار سرمایش ساختمان‌ها باشند و در نتیجه دمای آب رفت به طرف مدار ثانویه (ساختمان‌ها) برابر  $7$  درجه سانتیگراد نخواهد بود.

### الگوریتم راه‌اندازی و کنترل برج خنک‌کننده

این الگوریتم نیز در ابتدا در مورد اجازه فرمان از طریق BMS پرسش می‌کند که در صورت پاسخ مثبت، به سراغ بررسی شرایط راه‌اندازی برج خنک‌کننده می‌رود و پس از تایید شرایط، برج را روشن می‌کند. سپس باتوجه به مقادیر ورودی دمای مرطوب محیط، دمای اولیه آب خروجی از برج و کمترین دمای مجاز آب ورودی به کندانسور چیلر، فن را روشن می‌کند و یا در حالت خاموش نگه می‌دارد. برج خنک‌کننده مورد مطالعاتی دارای فن دو سرعت (کم یا زیاد) است. بنابراین قسمت کنترل سرعت فن برج، متناسب با این نوع فن طراحی شده است که سعی می‌کند حول یک نقطه بهینه از دمای آب خروجی برج، سرعت فن را کم یا زیاد کند. به‌طور تقریبی فن حدود ۹ دقیقه با سرعت کم و حدود ۹ دقیقه با سرعت زیاد کار می‌کند. الگوریتم همچنین در حین کار کردن فن، وضعیت اجرا و خطای عملیاتی برج و فیدبک سرعت

فن را دریافت می‌کند که در صورت وجود مشکل، پیام هشدار لازم اعلام شود و واکنش مناسب انجام گردد.

### الگوریتم راه‌اندازی و کنترل دیگ بخار

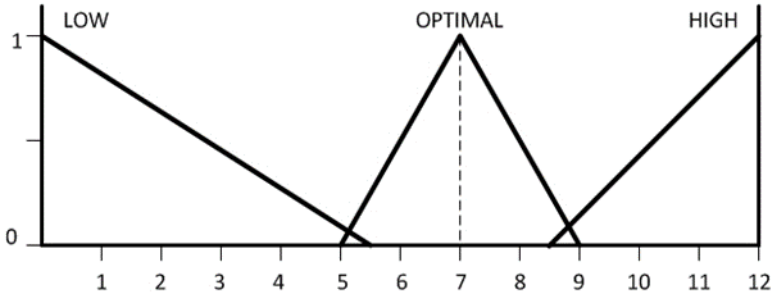
این الگوریتم بعد از بررسی اجازه فرمان بوسیله BMS و شرایط اولیه، دیگ را روشن می‌سازد و ابتدا مشعل را بر روی درجه کم تنظیم می‌کند و برای حدود حداقل ۱۰ دقیقه در این درجه ثابت نگه می‌دارد تا دیگ بخار به‌طور ناگهانی به درجه بالا و بحرانی نرسد که ممکن است منجر به انفجار دیگ گردد. بعد از این، فیدبک دمای بخار خروجی از دیگ را از سنسور مربوطه دریافت می‌کند تا مشعل دیگ را به نحوی تنظیم کند که دمای بخار خروجی برابر  $120^{\circ}\text{C}$  باشد. زیرا چیپلر جذبی (مورد مطالعاتی) برای عملکرد صحیح به بخار  $120^{\circ}\text{C}$  نیاز دارد. الگوریتم همچنین وضعیت‌های اجرا و خطای دیگ را دریافت می‌کند تا در صورت وجود نقص و خطا، به موقع متوجه آن شود و پیام هشدار را اعلام کند تا عمل مناسب صورت گیرد.

### ۲-۳. کنترلرهای فازی

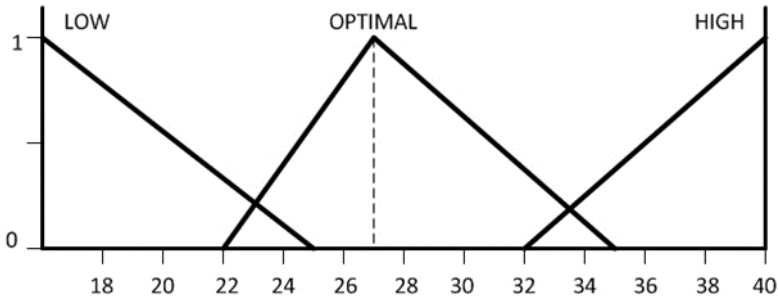
#### کنترلر فازی شیر بخار

- برای طراحی این کنترلر، پس از مطالعه کاتالوگ چیپلر جذبی، قوانین زیر استخراج شده‌اند:
۱. اگر دمای آب خروجی از اواپراتور چیپلر کم است آنگاه شیر کنترل بخار کاملاً بسته باشد.
  ۲. اگر دمای آب خروجی از اواپراتور چیپلر بهینه است آنگاه شیر کنترل بخار نیمه باز باشد.
  ۳. اگر دمای آب خروجی از اواپراتور چیپلر زیاد است آنگاه شیر کنترل بخار کاملاً باز باشد.
  ۴. اگر دمای آب ورودی به کندانسور چیپلر کم است آنگاه شیر کنترل بخار کاملاً بسته باشد.
  ۵. اگر دمای آب ورودی به کندانسور چیپلر بهینه است آنگاه شیر کنترل بخار نیمه باز باشد.
  ۶. اگر دمای آب ورودی به کندانسور چیپلر زیاد است آنگاه شیر کنترل بخار کاملاً باز باشد.

ورودی اول کنترلر، دمای آب خروجی از اواپراتور چیپلر هست و مقدار مطلوب در این طرح،  $7^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. ورودی دوم کنترلر، دمای آب ورودی به کندانسور چیپلر است که مقدار بهینه آن را  $27^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته‌ایم. توابع عضویت فازی مربوط به مجموعه‌های فازی این ورودی‌ها از نوع مثلثی هستند و طبق شکل‌های زیر تعریف شده‌اند:



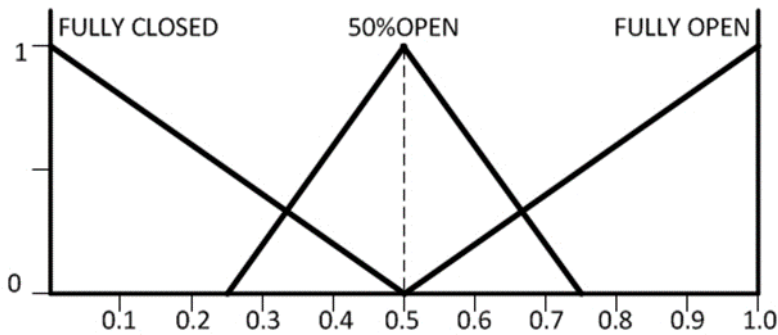
شکل ۲. توابع عضویت ورودی اول کنترلر فازی شیر بخار



شکل ۳. توابع عضویت ورودی دوم کنترلر فازی شیر بخار

خروجی این کنترلر، درصد بازبودن شیر بخار است که توابع عضویت فازی آن هم از نوع مثلثی است

و در شکل ۴ نشان داده شده است:



شکل ۴. توابع عضویت خروجی کنترلر فازی شیر بخار

موتور استنتاج و عملگرهای فازی که برای طراحی کنترلر فازی شیر بخار انتخاب شدند، عبارتند از: موتور استنتاج: ممدانی، عملگر اشتراک: Min، عملگر اجتماع: Max، عملگر استلزام: Min، عملگر تجمیع: Max، عملگر غیرفازی‌ساز: Centroid.

در مقابل این کنترلر فازی، یک کنترلر کننده خطی طراحی شده است که از قوانین زیر پیروی می‌کند: الف) اگر دمای آب خروجی از اواپراتور چیلر کمتر از  $7C^{\circ}$  است، آنگاه شیر کنترل بخار به تناسب اختلاف دما از  $7C^{\circ}$ ، بسته شود.

ب) اگر دمای آب خروجی از اواپراتور چیلر برابر  $7C^{\circ}$  است، آنگاه شیر کنترل بخار تغییر نکند.

ج) اگر دمای آب خروجی از اواپراتور چیلر بیش از  $7C^{\circ}$  است، آنگاه شیر کنترل بخار به تناسب اختلاف دما از  $7C^{\circ}$ ، باز شود.

د) اگر دمای آب ورودی به کندانسور چیلر کمتر از  $27C^{\circ}$  است آنگاه شیر کنترل بخار به تناسب اختلاف دما از  $27C^{\circ}$ ، بسته شود.

هـ) اگر دمای آب ورودی به کندانسور چیلر برابر  $27C^{\circ}$  است آنگاه شیر کنترل بخار تغییر نکند.

و) دمای آب ورودی به کندانسور چیلر بیش از  $27C^{\circ}$  است آنگاه شیر کنترل بخار، به تناسب اختلاف دما از  $27C^{\circ}$ ، باز شود.

### کنترلر فازی مشعل دیگ بخار

با مطالعه کاتالوگ دیگ بخار مورد مطالعاتی، قوانین زیر را برای طراحی این کنترلر در نظر گرفته‌ایم:

۱. اگر خطای دمای بخار منفی بود آنگاه میزان تغییرات نرخ مشعل منفی باشد تا نرخ مشعل کاهش یابد.

۲. اگر خطای دمای بخار عدد کوچک منفی بود آنگاه میزان تغییرات نرخ مشعل کمی منفی باشد تا نرخ مشعل کمی کاهش یابد.

۳. اگر خطای دمای بخار صفر بود آنگاه میزان تغییرات نرخ مشعل صفر باشد تا نرخ مشعل تغییر نکند.

۴. اگر خطای دمای بخار مثبت بود آنگاه میزان تغییرات نرخ مشعل مثبت باشد تا نرخ مشعل افزایش یابد.

۵. اگر خطای دمای بخار عدد کوچک مثبت بود آنگاه میزان تغییرات نرخ مشعل کمی مثبت باشد تا نرخ مشعل کمی افزایش یابد.

۶. اگر نرخ قبلی مشعل خیلی کم بود آنگاه میزان تغییرات نرخ مشعل مثبت باشد تا نرخ مشعل افزایش یابد.

۷. اگر نرخ قبلی مشعل کم بود آنگاه میزان تغییرات نرخ مشعل کمی مثبت باشد تا نرخ مشعل کمی افزایش یابد.

۸. اگر نرخ قبلی مشعل بهینه بود آنگاه میزان تغییرات نرخ مشعل صفر باشد تا نرخ مشعل تغییر نکند.

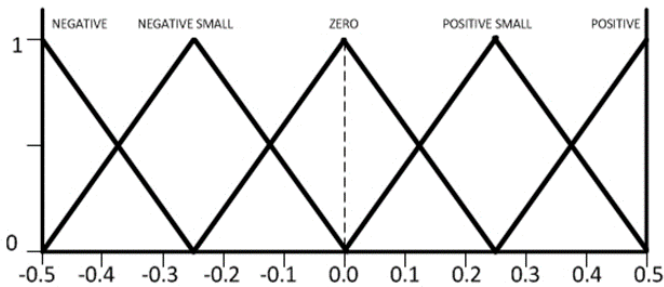
۹. اگر نرخ قبلی مشعل زیاد بود آنگاه میزان تغییرات نرخ مشعل کمی منفی باشد تا نرخ مشعل کمی کاهش یابد.

۱۰. اگر نرخ قبلی مشعل خیلی زیاد بود آنگاه میزان تغییرات نرخ مشعل منفی باشد تا نرخ مشعل کاهش یابد.

ورودی اول این کنترل کننده، نرخ خطای دمای بخار خروجی دیگ از دمای بهینه بخار است. دمای

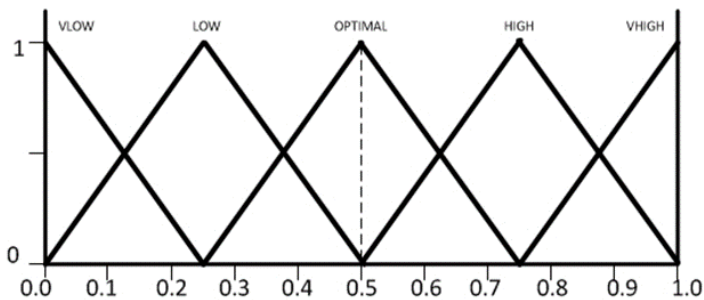
بخار مطلوب در مورد مطالعاتی،  $120^{\circ}\text{C}$  است. توابع عضویت ورودی اول این کنترلر فازی که مثلی

شکل هستند در شکل ۵ مشاهده می‌کنید:



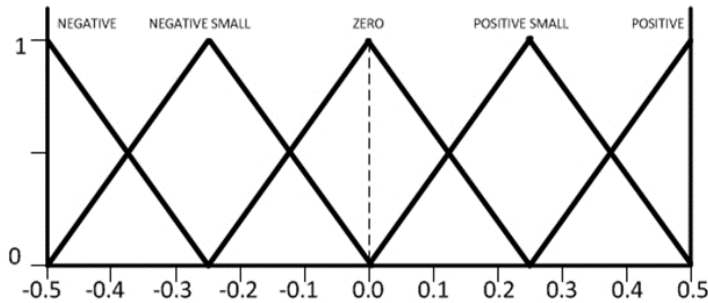
شکل ۵. توابع عضویت ورودی اول (خطا) کنترلر فازی مشعل دیگ بخار

ورودی دوم کنترلر نرخ قبلی مشعل دیگ است. بنابراین توابع عضویت ورودی به شکل زیر تعریف شده‌اند:



شکل ۶. توابع عضویت ورودی دوم (نرخ قبلی مشعل) کنترلر فازی مشعل دیگ بخار

توابع عضویت مربوط به خروجی این کنترلر، که درصد نرخ مشعل است و به تناسب تغییر دمای بخار افزایش یا کاهش می‌یابد، را می‌توانید در شکل ۷ ببینید.



شکل ۷. توابع عضویت خروجی کنترلر فازی مشعل دیگ بخار

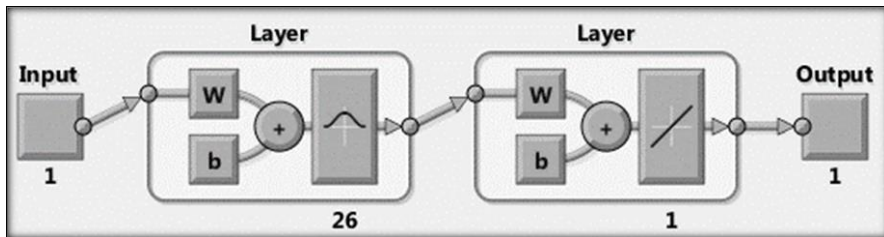
موتور استنتاج و عملگرهای فازی که برای طراحی کنترلر فازی مشعل دیگ بخار انتخاب شدند، عبارتند از: موتور استنتاج: مدانی، عملگر اشتراک: Min، عملگر اجتماع: Max، عملگر استلزام: Min، عملگر تجمیع: Max، عملگر غیرفازی‌ساز: Centroid.

در مقابل کنترلر فازی مشعل دیگ، کنترلر خطی طبق این قوانین طراحی شده است:

- الف) اگر دمای بخار خروجی از دیگ بخار برابر  $0^{\circ}\text{C}$  است، آنگاه میزان مشعل دیگ برابر ۲۵٪ باشد.
- ب) اگر دمای بخار خروجی از دیگ بخار برابر  $120^{\circ}\text{C}$  است، آنگاه میزان مشعل دیگ برابر ۵۰٪ باشد.
- ج) اگر دمای بخار خروجی از دیگ بخار کمتر از  $120^{\circ}\text{C}$  و بیش از  $0^{\circ}\text{C}$  است، آنگاه میزان مشعل دیگ به تناسب اختلاف دما از  $120^{\circ}\text{C}$ ، از ۵۰٪ بیشتر شود.
- د) اگر دمای بخار خروجی از دیگ بخار بیش از  $120^{\circ}\text{C}$  است، آنگاه میزان مشعل دیگ به تناسب اختلاف دما از  $120^{\circ}\text{C}$ ، از ۵۰٪ کمتر شود. دقت کنید که در طراحی این کنترلر فرض شده است که وقتی میزان مشعل دیگ برابر ۵۰٪ است، دمای بخار خروجی از دیگ بخار برابر  $120^{\circ}\text{C}$  خواهد شد.

## ۲-۴. طراحی حسگرهای نرم

اکثر اطلاعات ورودی به سیستم مدیریت ساختمان مدنظر، از حسگرهای دما دریافت می‌گردند. به دلیل عدم دسترسی کامل به سنسورهای واقعی و همچنین پیچیدگی مدل مؤلفه‌های مورد مطالعاتی، جهت مدلسازی حسگرهای واقعی دما از حسگرهای مجازی یا حسگرهای نرم استفاده کردیم که در واقع شامل مدلسازی سیستم هم هستند. البته این حسگرهای مجازی می‌توانند جهت تشخیص عیب سنسورهای واقعی و بازسازی عملکرد سنسورهای معیوب به کار روند. ۵ نوع حسگر دمای مجازی داریم که برای طراحی همه آنها از شبکه عصبی با تابع پایه شعاعی (RBF) که شامل دو لایه داخلی، یک ورودی و یک خروجی و تابع پایه شعاعی از نوع گوسی است، بهره بردیم (شکل ۸). پارامتر حداکثر نوروها و پارامتر دامنه گستردگی در حسگرهای مجازی مختلف، متفاوت است که در اینجا از بیان این جزئیات خودداری می‌کنیم. طراحی شبکه‌های عصبی را با نرم‌افزار متلب انجام داده‌ایم. جهت آزمایش و بررسی میزان خطای هر شبکه عصبی، ما کارایی را برابر خطای MSE<sup>۱</sup> از مقدار واقعی خروجی تعریف نموده‌ایم و هدف این بوده که میزان این خطا برابر صفر شود.



شکل ۸. ساختار شبکه عصبی RBF مورد استفاده

برای یادگیری این شبکه‌های عصبی، از نمودارهای موجود در کاتالوگ‌های چیلر جذبی و نمودارهای متعلق به متون آموزشی شرکت معتبر و معروف TRANE نمونه برداری کرده‌ایم و و نقاط ورودی/خروجی را استخراج نمودیم و برای آموزش شبکه عصبی به کار بردیم.

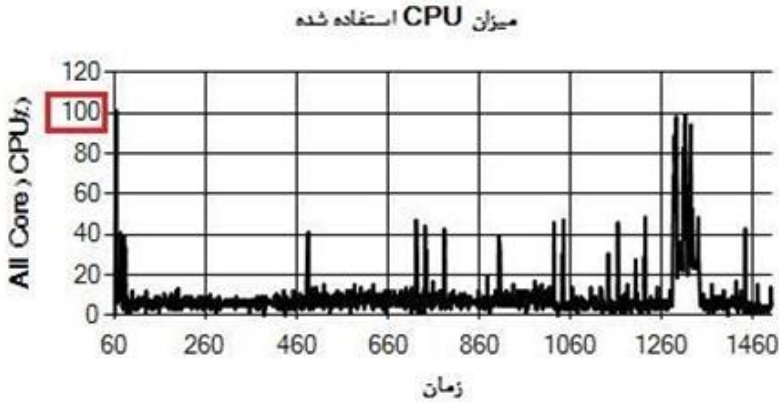
1. Mean Squared Error

### ۳. شرایط آزمایش و نتایج

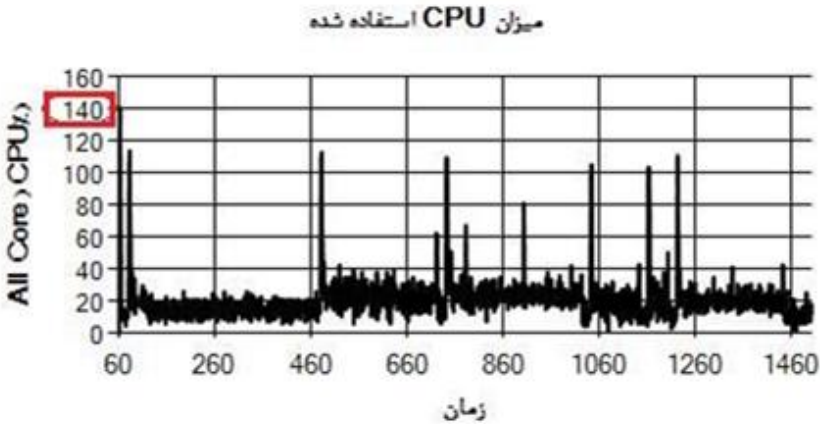
برای انجام آزمایش و بررسی تاثیر طرح پیشنهادی، یک BEMS مبتنی بر استراتژی متمرکز مرسوم طراحی کردیم. در این روش، از عامل هوشمند استفاده نشده است و متشکل از سه لایه است. لایه کنترل، خود از سه ماژول تشکیل شده است که هر ماژول کنترل مؤلفه‌های متناظر را برعهده دارد. در لایه حسگرها اطلاعات حسگرها، فلومترها و اطلاعات ورودی قرار دارد. ارتباط بین دو لایه دیگر از طریق لایه مدیریت صورت می‌گیرد که بر دو لایه دیگر نظارت دارد. مؤلفه‌های لایه کنترل در صورتی نیاز به اطلاعات لایه سنسور، درخواست خود را به لایه مدیریت ارسال می‌کند و لایه مدیریت این درخواست را به لایه سنسور ارسال می‌کند. لایه سنسور پاسخ مناسب را به لایه مدیریت می‌فرستد و لایه مدیریت آنرا به لایه کنترل تحویل می‌دهد. لایه مدیریت درخواست‌ها را در صف قرار می‌دهد و تلاش می‌کند به هر درخواست در اولین فرصت پاسخ دهد.

یک برنامه شبیه ساز با به‌کارگیری هر دو BEMS و الگوریتم‌ها و کنترلرهای فازی و غیر فازی که در بخش‌های قبلی توضیح داده شده‌اند، طراحی شده و چندین بار اجرا و مورد آزمایش قرار گرفته است. باید توجه داشت که هر دو استراتژی توزیع شده و استراتژی متمرکز را با شرایط یکسان پیاده‌سازی و اجرا کرده‌ایم. به این معنی که کد هر دو استراتژی با زبان برنامه‌نویسی C# و به شیوه چند نخ (Multi-threading) نوشته شده است، هر دو استراتژی بر روی یک لب‌تاپ ۸ هسته‌ای Core™ i7 تست و اجرا شده‌اند و در هر دو استراتژی از الگوریتم‌های کنترلی بخش ۲.۲ استفاده نموده‌ایم. در بیشتر موارد، نتایج بیانگر مصرف کمتر CPU توسط استراتژی پیشنهادی است. برای نمونه، شکل (۹.الف) و (۹.ب) مصرف پردازشگر توسط هر دو استراتژی، از ساعت ۱ تا ۲۴ یک روز با اوج بار سرمایه‌ی ساختمان‌ها، را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌گردد استراتژی توزیع شده، پردازشگر را کمتر اشغال می‌کند که در این آزمایش میانگین مصرف CPU توسط روش متمرکز ۲۱/۱۳ درصد و میانگین مصرف CPU توسط روش پیشنهادی ۸/۳۹ درصد است و حدود ۶۰ درصد بهره‌وری در مصرف CPU با استراتژی پیشنهادی ایجاد شده است. یکی از دلایل استفاده بیشتر استراتژی متمرکز از پردازشگر، رسیدگی لایه مدیریت به پیام‌ها و درخواست‌های ارسالی از دو لایه کنترل و حسگرها است. باید توجه داشت که در طرح پیشنهادی، عامل‌های هوشمند به‌طور مستقل، همزمان و به‌صورت موازی، مؤلفه متناظر خود را کنترل می‌کنند. در حالی که در استراتژی متمرکز، لایه مدیریت باید

بر عملکرد دو لایه دیگر نظارت داشته باشد و تصمیم‌گیری و کنترل به صورت متمرکز و غیر مستقل انجام می‌گیرد که می‌تواند منجر به ایجاد گلوگاه شود.



شکل ۹. الف) نمودار استفاده از پردازشگر در استراتژی توزیع شده (پیشنهادی)

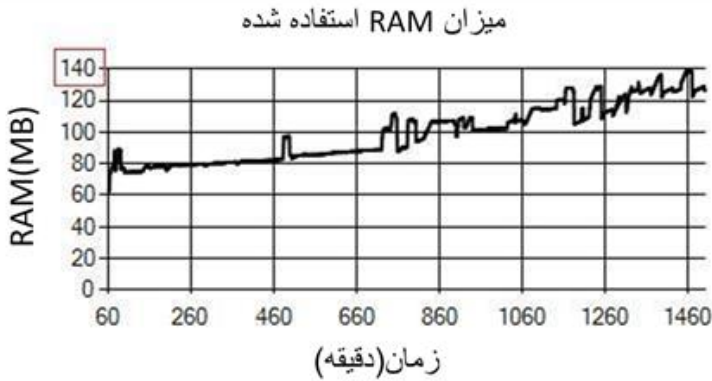


شکل ۹. ب) نمودار استفاده از پردازشگر در استراتژی متمرکز

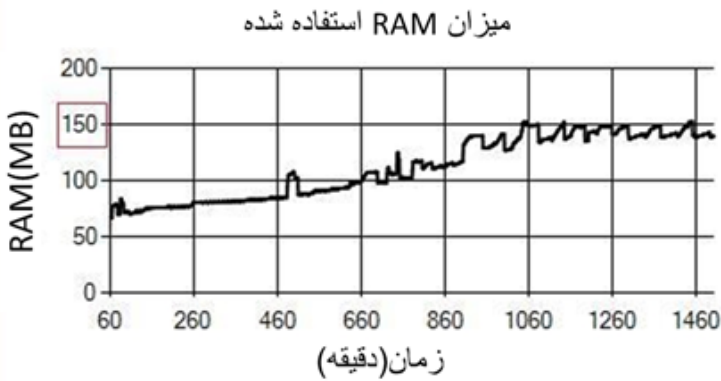
زمان برحسب دقیقه و مصرف پردازشگر (۸ تا هسته) برحسب درصد

در استفاده از حافظه اصلی (RAM) نیز، به‌طور کلی استراتژی پیشنهادی نتایج بهتری را نشان می‌دهد و این موضوع در شکل (الف.۱۰) و شکل (ب.۱۰) که به ترتیب نمایشگر میزان مصرف RAM استراتژی توزیع شده و متمرکز هستند، مشهود است. این نتایج نیز از آزمایش در بازه زمانی ساعت ۱ تا ۲۴ یک روز با اوج بار سرمایه‌های ساختمان‌ها، حاصل شده است. در این آزمایش میانگین مصرف RAM استراتژی متمرکز

برابر است با ۱۱۲/۲۴ مگابایت و میانگین مصرف RAM استراتژی توزیع شده برابر است با ۹۸/۹۸ مگابایت که در نتیجه حدود ۱۲ درصد کاهش مصرف RAM نسبت به استراتژی متمرکز داشته است.



شکل ۱۰. الف) نمودار استفاده از حافظه اصلی در استراتژی توزیع شده (پیشنهادی)

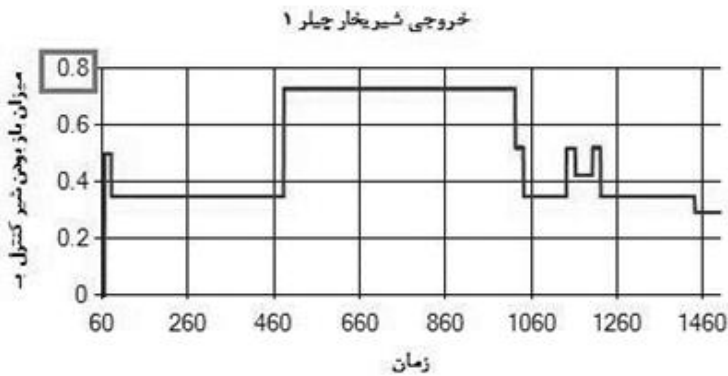


شکل ۱۰. ب) نمودار استفاده از حافظه اصلی در استراتژی متمرکز

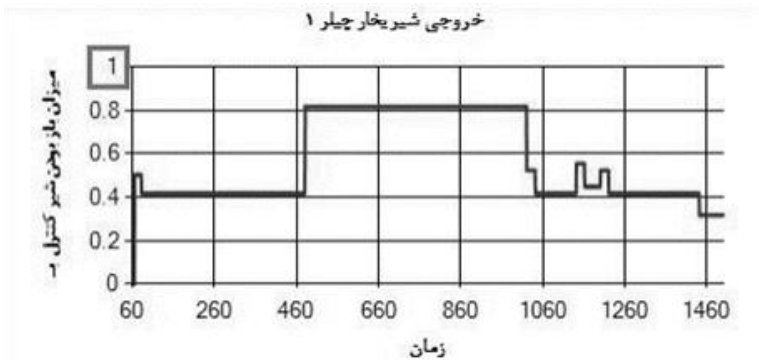
زمان بر حسب دقیقه و مصرف حافظه اصلی بر حسب مگا بایت

جهت تأثیر عملکرد کنترل‌کننده فازی شیر بخار چیلر، برای هر دو استراتژی یکبار با کنترلر فازی و بار دیگر با کنترلر خطی بارها مورد تست قرار دادیم که نتایج بیانگر عملکرد بهتر کنترلر فازی بوده‌اند. برای نمونه نتایج خروجی آزمایش با استراتژی توزیع‌شده و پروفایل ساعت ۱۲ تا ۱۴ یک روز با اوج بار سرمایش ساختمان‌ها در شکل ۱۱. الف و ۱۱. ب ترسیم شده‌اند، که خروجی میزان باز بودن شیر بخار

ورودی به ژنراتور چیلر است. مقایسه این دو نمودار نشان می‌دهد که کنترل‌کننده فازی منجر به مصرف کمتر بخار می‌گردد که خود منجر به مصرف کمتر انرژی جهت تولید بخار می‌شود. در نمودارهای زیر، رنج حداکثر میزان باز بودن شیر بخار با مستطیل قرمز رنگ مشخص شده است. در این آزمایش میانگین بخار ورودی به چیلر ۱ توسط کنترلر فازی شیر بخار برابر  $۰.۲/۳۰۳/۴۵$  (پوند بر ساعت) و توسط کنترلر خطی شیر بخار برابر  $۵۸/۵۵/۵۰$  (پوند بر ساعت) است و در نتیجه کنترلر فازی شیر بخار منجر به حدود ۱۱ درصد بهبود در مصرف بخار می‌گردد.



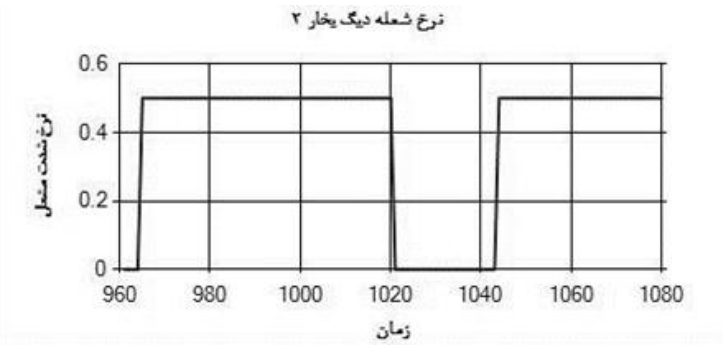
شکل ۱۱. الف) نمودار خروجی کنترلر فازی شیر بخار در استراتژی توزیع شده



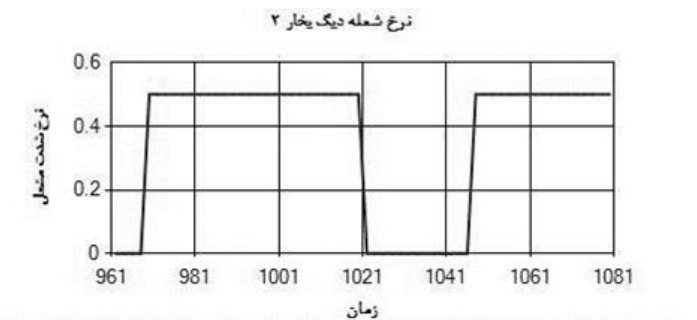
شکل ۱۱. ب) نمودار خروجی کنترلر خطی شیر بخار در استراتژی توزیع شده

زمان بر حسب دقیقه

در شکل‌های (۱۲.الف) و (۱۲.ب) نمودارهای خروجی کنترلرهای فازی و خطی مشعل دیگ بخار را ارائه کرده‌ایم. هر دو کنترلر با استراتژی توزیع‌شده، بازه زمانی و پروفایل بار سرمایش یکسان (ساعت ۱۶ تا ۱۸ یک روز با اوج بار سرمایش) اجرا و آزمایش شده‌اند. همانطور که دیده می‌شود خروجی هر دو کنترلر بر روی مقدار بهینه پایدار شده است. اما اگر ضرایب کنترلر خطی را به مقدار کمتر از  $0.0001$  تغییر دهیم، خروجی کنترلر دچار نوسانات حول نرخ بهینه ( $50\%$ ) می‌گردد (شکل ۱۲.ج) و هر چه میزان این تغییر بیشتر باشد، شدت نوسان افزایش می‌یابد. به این معنی که کنترلر خطی در برابر عدم قطعیت مدل از جمله عوامل تغییر دهنده پارامترهای کنترلر خطی مانند استهلاک و عوامل محیطی مقاوم نیست. برای استراتژی متمرکز هم همین نتایج مشاهده می‌گردند.

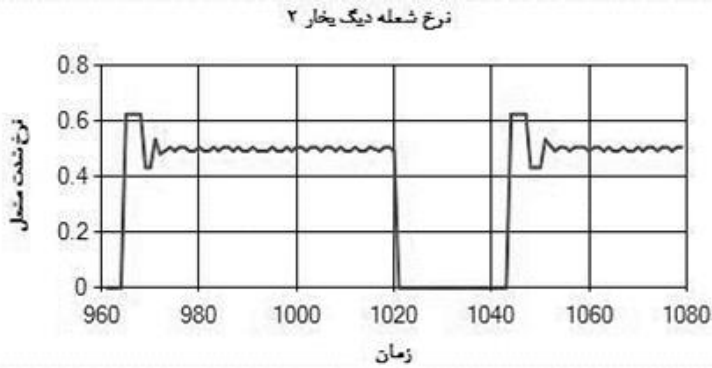


شکل ۱۲ الف) نمودار خروجی کنترلر فازی مشعل دیگ بخار (استراتژی پیشنهادی)



شکل ۱۲. ب) نمودار خروجی کنترلر خطی مشعل دیگ بخار (استراتژی پیشنهادی)

زمان بر حسب ساعت



شکل ۱۱. ج) نمودار خروجی کنترلر غیرفازی مشعل دیگ بخار (استراتژی پیشنهادی)

با تغییر جزئی (کمتر از ۰.۰۰۰۱) در ضرایب

#### ۴. نتیجه‌گیری و کارهای آینده

##### ۴-۱. خلاصه و نتیجه تحقیق

اتوماسیون و مدیریت انرژی ساختمان از ۴۰ سال پیش که از یک کامپیوتر مرکزی بزرگ استفاده می‌شد و برای کنترل سیستم تهویه مطبوع فقط روش کنترلی خاموش / روشن به کار می‌رفت تاکنون، راه طولانی را پیموده است. بعد از ارائه فن‌آوری‌های مبتنی بر IP و تصویب پروتکل‌های اتوماسیون ساختمان، گام اساسی در بهبود سیستم مدیریت انرژی ساختمان برداشته شده و نیاز به حفظ آسایش ساکنین در کنار کاهش هزینه انرژی و بهبود عملیاتی، منجر به پیشرفت چشمگیری در حوزه BEMS گردیده است. امروزه، با توجه به حجم بالای اطلاعات و وظایف متعددی که باید توسط یک سیستم مدیریت انرژی ساختمان رسیدگی شود و بروز تکنولوژی‌های مبتنی بر پردازش ابری و اینترنتی از اشیاء و ظهور رویکردهای مدیریت داده‌های عظیم، نیاز به استراتژی‌های جدید در طراحی BEMS است که مبتنی بر فن‌آوری‌های نوین بوده، از هوشمندی لازم برخوردار باشد و تا حد ممکن خودکار عمل نماید.

در این تحقیق یک سیستم مدیریت انرژی ساختمان مبتنی بر مفاهیم هوش توزیع‌شده ارائه کردیم که از یک سیستم چند عامله همکار مجهز به کنترلر فازی و حسگرهای مجازی، جهت کنترل مؤلفه‌های موتورخانه HVAC استفاده می‌کند. در طراحی سیستم نقاط مهم زمانبندی و نظارتی BEMS محسوب شدند و به عنوان ورودی‌های سیستم و الگوریتم‌های کنترلی در نظر گرفته شده‌اند. در الگوریتم توالی عملکرد چند چیلر، مفهوم تسهیم بار را به کار برده‌ایم که منجر به ضریب کارایی مناسب چیلرها می‌گردد. در این طرح برخلاف بسیاری

از کارهای گذشته، توپولوژی عامل‌های همکار افقی است و هر عامل خود داده‌های ورودی و خروجی‌اش را نظارت و بررسی می‌کند و وظایف محوله را مدیریت می‌نماید. ضمن اینکه این طرح در بستر عملیات اجزای موتورخانه HVAC و در بخش مدار اولیه سیستم تهویه مطبوع ارائه شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که در مقایسه با رویکردهای مرسوم و متمرکز طرح پیشنهادی با حفظ ویژگی استقلال و موازی‌سازی، منابع پردازشگر و حافظه اصلی را کمتر مشغول نگه می‌دارد. همچنین مقایسه عملکرد کنترلرهای فازی و خطی شیر بخار، حاکی از کنترل بهتر شیر بخار توسط کنترلر فازی است که منجر به مصرف کمتر انرژی می‌شود.

#### ۴-۲. پیشنهادات برای تحقیقات آتی

این طرح شامل مؤلفه‌های متعددی است که می‌توان در آینده برای بهبود عملیاتی هر کدام از آنها تحقیقات زیادی انجام داد. همچنین از آنجا که طرح قابلیت توسعه یافتن خوبی دارد، می‌توان مؤلفه‌های جدیدی به سیستم اضافه کرد و سیستم را تا حدی گسترش داد که به یک BIEMS جامع و یکپارچه دست یابیم. از سوی دیگر با هدف ارتقای هوشمندسازی BIEMS، می‌توان هر عامل هوشمند را به مؤلفه‌های بیشتر هوش مصنوعی مجهز نمود و کنترلرهای فازی و حسگرهای مجازی را با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه سازی هوشمند بهبود داد.

#### سپاسگزاری

این مقاله از پایان نامه ارشد مهندسی کامپیوتر دانشگاه آزاد اسلامی مشهد استخراج شده است که مورد مطالعاتی یکی از موتورخانه‌های حرم مطهر رضوی بوده است. لذا مراتب تشکر صمیمانه خود را از آقای مهندس داوود فیروز معاونت وقت بخش نوسازی حرم مطهر و کادر مهندسی بخش نوسازی و بهره برداری حرم مطهر برای در اختیار قراردادن اطلاعات مورد نیاز و همکاری لازم جهت آشنایی با موتورخانه سیستم تهویه مطبوع اعلام می‌کنیم. همچنین سپاس و تقدیر ویژه خود را از آقایان پروفسور محمد مقیمان، دکتر اردشیر فرشیدیان فر و پروفسور انوشیروان فرشیدیان فر از گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد و دکتر مهدی معصومی حقیقی از دانشگاه برکلی، و کارشناسان خبره و مجرب سیستم تهویه مطبوع و سیستم مدیریت انرژی ساختمان آقایان مهندس محمدرضا باقری، مهندس حسین میرقانی، مهندس بهرام خاکپور، مهندس کاظم غفرانی و دکتر حسام سیاف برای ارائه تجربیات و راهنمایی‌های ارزنده خود ابراز می‌نماییم.

## منابع

- [۱] کیالاشکی یاسر و ستاری سورنا (۱۳۹۵)، نشریه انرژی ایران، سال نوزدهم، شماره ۲، صص ۱۶۰-۱۶۹.
- [2] Afram, A. and F. Janabi-Sharifi (2014), "Theory and Applications of HVAC Control Systems – A review of model predictive control (MPC)", *Building and Environment*, Vol.72, pp. 343-355.
- [3] Afroz, Z. et al. (2017), "Modeling Techniques used in Building HVAC Control Systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.83, pp. 64-84.
- [4] Al-Ali, A. R. et al. (2013), "Smart Grid Controller for Optimizing HVAC Energy Consumption", *International Conference on Computer Systems and Industrial Informatics, Sharjah, IEEE xplore*, No. cfp1245u-art, pp. 1-4.
- [5] Beghi A. et al. (2012), "A PSO-based Algorithm for Optimal Multiple Chiller Systems Operation", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 32, pp. 31-40.
- [6] Brooks R. A. et al. (1997), *The Intelligent Room Project in Proceedings of the 2nd International Conference on Cognitive Technology (CT '97)*, Aizu(Japan), IEEE Computer Society, Vol.1, pp. 271 .
- [7] Dounis A. I. and C. Caraiscos (2009), "Advanced Control Systems Engineering for Energy and Comfort Management in a Building Environment-A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.13, pp. 1246-1261.
- [8] Fortuna L. et al. (2007), "Soft Sensors for Monitoring and Control of Industrial Processes", Springer-Verlag, London.
- [9] Gonzaga J.C.B. et al. (2009), "ANN-based soft-sensor for real-time Process Monitoring and Control of an Industrial Polymerization Process", *Computers and Chemical Engineering*, Vol.33, No. 1, pp. 43-49.
- [10] Gonzalez-Briones A. et al. (2018), "Multi-agent Systems Applications in Energy Optimization Problems: A state-of-the-art Review", *Energies*, Vol.11, No. 1928, pp. 1-28.
- [11] Haghghi M.M. (2013), "Controlling energy-efficient Buildings in the Context of Smart grid: A cyber physical", *Electrical Engineering and Computer Sciences University of California at Berkeley*, Technical Report No. UCB/EECS-2013-244.
- [12] Hagrass H. et al. (2003), "A Hierarchical Fuzzy-genetic Multi-agent Architecture for Intelligent Buildings online Learning, Adaptation and Control", *Information Sciences*, Vol.150, No.1-2, pp. 33-57.
- [13] Hepworth S.J. and A.L. Dexter (1994), *Neural Control of Non-linear HVAC plant*, *Proceedings of IEEE International Conference on Control and Applications*, Glasgow, UK, Vol.3, pp. 1849-1854.
- [14] Huang M. et al. (2015), "A sensor-software based on a Genetic Algorithm-based Neural Fuzzy System for Modeling and Simulating a Wastewater Treatment Process", *Applied Soft Computing*, Vol.27, pp. 1-10.

- [15] Jafari H. H. et al. (2016), "Energy Planning and Policy Making; the case study of Iran", *Energy Sources Part B: Economics, Planning, and Policy*, Vol.11, No. 8, pp. 682-689.
- [16] Kadlec P. et al. (2009), "Data-driven soft Sensors in the Process Industry", *Computers and Chemical Engineering*, Vol.33, No. 4, pp. 795-814.
- [17] Karri R.R. et al. (2009), "Soft Sensor based Nonlinear Control of a Chaotic Reactor", *Intelligent Control Systems and Signal Processing*, Vol.42, No. 19, pp.537-543.
- [18] Klein L. et al. (2012), "Coordinating occupant behavior for building energy and comfort management using multi-agent systems", *Automation in Construction*, Vol.22, pp. 525-536.
- [19] Kljajic M. et al. (2012), "Use of neural networks for modeling and predicting boiler's operating performance", *Energy*, Vol.45, No.1, pp. 304-311.
- [20] López A.M. et al. (2004), "An evolutionary Algorithm for the off-line data Driven Generation of Fuzzy Controllers for Intelligent Buildings, Systems, man and cybernetics", 2004 IEEE international conference on systems, Man and Cybernetics, IEEE Xplore, The Hague, Cat. No.04CH37583, Vol.1, pp. 42-47.
- [21] Mahdavejad M.j. and M. Abedi (2012), "Subsidize-reform Plan and Energy Efficiency in Building Energy Consumption in case of Iran, in SAVAP International", *Academic Research International*, Vol.2, No. 3, pp. 637-645.
- [22] Mirinejad H. et al. (2012), "A Review of Intelligent Control Techniques in HVAC systems", *IEEE Energytech*, Inspec.No.12998582, pp. 1-5.
- [23] Mokhtar M. et al. (2013), "Intelligent multi-agent System for Building Heat Distribution Control with Combined gas Boilers and Ground Source heat pump", *Energy and Buildings*, Vol.62, pp. 615-626.
- [24] Swider D.J. et al. (2001), "Modelling of Vapour-compression Liquid Chillers with Neural Networks", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, No.3, pp. 311-329.
- [25] Vakiloroya V. et al. (2014), "A review of Different Strategies for HVAC Energy Saving", *Energy Conversion and Management*, Vol.77, pp. 738-754.
- [26] Yu Z. and F. Haghghat et al. (2010), "A Decision Tree Method for Building Energy Demand Modeling", *Energy and Buildings*, Vol.42, No. 10, pp. 1637-1646.
- [27] Henry K. (2014). Schneider Siemens lead Building Energy Management market, Navigant Says, [Online]. Available at: <http://www.energymanagertoday.com/schneider-and-siemens-lead-bems-market-navigant-says-0102810/>. [Accessed 5 September 2015].
- [28] Nastu, P. (2020), BEMS market will grow to \$5.6 billion by 2020, 7 August 2013. [Online]. Available: <http://www.energymanagertoday.com/bems-market-will-grow-to-5-6-billion-by-2020-094340/>. [Accessed 5 September 2015].
- [29] Nastu P. (2012), Smart Building Energy Management to top \$1bn by 0202, 10 September 2012. [Online]. Available: <http://www.energymanagertoday.com/smart-building-energy-management-to-top-1bn-by-2020-084421/>. [Accessed 5 September 2015].