

برنامه‌ریزی بهینه سیستم‌های تهویه مطبوع با کنترل همزمان نقطه تنظیم ترموستات و پهنای باند مرده با در نظر گرفتن مدیریت ریسک

اشکان طالبی^۱ علیرضا حاتمی^۲

۱- دانشجوی دکتری- گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا- همدان- ایران

ashkantalebi03@gmail.com

۲- استادیار- گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا- همدان- ایران

hatamisharif@basu.ac.ir

چکیده: سیستم‌های تهویه مطبوع به عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان تجاری و خانگی، نقش مهمی در پاسخگویی بار دارند. در این پژوهش با استفاده از داده‌های پیش‌بینی دمای هوا و پیش‌بینی قیمت برق، برنامه‌ریزی بهینه نقطه تنظیم ترموستات به نحوی انجام شده است که هزینه برق مصرفی کاربر حداقل شود. پیش‌بینی قیمت برق با استفاده از مدل آریمای پیش‌بینی دمای هوا با استفاده از زنجیره مارکوف صورت گرفته است. از آنجا که پیش‌بینی‌ها دارای قطعیت نیستند، باید ریسک در نظر گرفته شود. بدین منظور با تولید سناریوهای مختلف و با استفاده از CVaR تلاش شده است تا ریسک مدیریت شود. با کمک داده‌های فوق و با استفاده از الگوریتم فراابتکاری GWO، برنامه‌ریزی بهینه نقطه تنظیم ترموستات و پهنای باند مرده انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که این شیوه برنامه‌ریزی می‌تواند اثر مهمی در مشارکت سیستم‌های تهویه مطبوع در پاسخگویی بار داشته باشد. همچنین نشان داده شده است که مدیریت باند مرده نقش مؤثری در مدیریت مصرف انرژی ایفا می‌کند. با مطالعه سطح ریسک‌پذیری افراد مختلف، نشان داده شده است که افراد ریسک‌پذیرتر مشارکت بیشتری در برنامه‌های پاسخگویی بار دارند و هزینه انرژی کمتری را متحمل می‌شوند. همچنین اثر دمای مطلوب کاربر بر انرژی مصرفی و هزینه کاربر سنجیده شده است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت ریسک، سیستم‌های تهویه مطبوع، برنامه‌ریزی بهینه، الگوریتم GWO، باند مرده

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.297

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا حاتمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - همدان - بلوار شهید احمدی روشن - دانشگاه بوعلی سینا - دانشکده‌ی فنی مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

در یک سیستم قدرت، نمودار مصرف برق در حالتی ایده‌آل است که تا حد ممکن یکنواخت باشد. بدین منظور و با استفاده از مفهوم پاسخگویی بار، در ساعات پیک مصرف برق تلاش می‌شود تا برخی از بارها خاموش شوند و در صورت امکان، مصرف آنها به ساعات کم باری منتقل شود [۱]. به خصوص در سیستم‌های توزیع انرژی وابسته به انرژی‌های نو، این امر اهمیت بیشتری می‌یابد [۲]. در این زمینه، یکی از تجهیزات مؤثر بارهای حرارتی و بخصوص سیستم‌های تهویه مطبوع هستند که به علت مصرف انرژی بالا و تعداد ساعات کاری زیاد، بارهای بسیار مهمی از دیدگاه پاسخگویی بار به شمار می‌روند [۳]. با استفاده از کنترل این تجهیزات، می‌توان مشکل عدم تطابق تولید و مصرف را تا حدی حل کرد [۴]. با توجه به تعداد بالای سیستم‌های تهویه مطبوع می‌توان از آنها جهت هموار کردن پروفیل بار [۵] و پیک‌سایی استفاده نمود [۶].

در همین راستا، یکی از راهکارهای پیشنهادی پژوهشگران استفاده از کنترل مستقیم سیستم‌های تهویه مطبوع می‌باشد. هنگامی که شبکه برق با مشکل مواجه می‌شود، به منظور اصلاح پروفیل بار دستور خاموش یا روشن شدن تعدادی از این تجهیزات صادر می‌شود [۷، ۸]. البته کنترل مستقیم سیستم‌های تهویه مطبوع به اندازه کافی تأثیرگذار نیست و اختلال شدیدی در رفاه کاربران نیز ایجاد می‌کند [۹]. یکی از راه‌های انتقال مصرف سیستم‌های تهویه مطبوع، استفاده از تغییر نقطه تنظیم ترموستات است [۱۰]. این روش، راهکار بسیار مؤثری است و اختلال چندانی نیز در رفاه کاربر ایجاد نمی‌کند. روش‌هایی که بصورت لحظه‌ای سیستم را کنترل می‌کنند، هرچند دارای انعطاف‌پذیری مناسبی هستند اما چون اقدامات خود را صرفاً بر مبنای اطلاعات لحظه‌ای انجام می‌دهند، نمی‌توانند به اندازه سیستم‌های پیش‌بینی‌کننده متمر ثمر باشند [۱۱]. سیستم‌هایی که از پیش‌بینی در کنترل بهره می‌برند، با داشتن یک دید کلی از اتفاقات آینده، تصمیمات بهینه‌تری را اتخاذ می‌کنند.

مرجع [۱۲] یک بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با روش تخمین دونقطه‌ای، با در نظر گرفتن خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه کرده است تا بهره‌وری حداکثر و هزینه حداقل شود. مرجع [۱۳] با استفاده از مفاهیم شناسایی سیستم، کنترل پیش‌بین و الگوریتم ژنتیک، عملیات تنظیم دما را انجام داده است. مرجع [۱۴] با روش برنامه‌ریزی چهارگانه، برنامه‌ریزی بهینه‌ای برای حداقل کردن هزینه انرژی چیلر سیستم تهویه مطبوع انجام داده است. مرجع [۱۵] بهینه‌سازی چندهدفه را با اهداف حداقل کردن انرژی مصرفی و حداکثر کردن رفاه کاربر انجام داده است. در مراجع فوق ریسک پیش‌بینی پارامترهای مختلف در نظر گرفته نشده است؛ این در حالی است که در کنترل‌های مبتنی بر پیش‌بینی، وجود ریسک، اجتناب‌ناپذیر، اما قابل مدیریت است [۱۶]. مرجع [۱۷] برنامه‌ریزی بهینه‌ای برای انرژی

مصرفی سیستم‌های تهویه مطبوع داشته است؛ خطای پیش‌بینی آب و هوا، و همچنین ریسک این خطا در نظر گرفته شده است، اما قیمت برق بصورت قطعی در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی GWO [۱۸] در ابتدای هر روز، با پیش‌بینی دمای هوا در طول شبانه روز، و پیش‌بینی قیمت برق، یک برنامه‌ریزی بهینه برای عملکرد سیستم تهویه مطبوع تعیین می‌شود؛ بدین صورت سیستم‌های تهویه مطبوع، با استفاده از مدیریت نقطه تنظیم ترموستات، و باند مرده، در پیک‌سایی و مدیریت مصرف انرژی مشارکت خواهند داشت. این برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته است. همچنین این برنامه‌ریزی، به نحوی صورت می‌گیرد که رفاه کاربر مختل نشود.

بنابراین نوآوری مقاله بدین شرح است:

* در این پژوهش، ریسک پیش‌بینی قیمت برق و دمای هوا در برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است.

* در این پژوهش، علاوه بر برنامه‌ریزی نقطه تنظیم ترموستات سیستم تهویه مطبوع، برنامه‌ریزی باند مرده این سیستم نیز صورت گرفته است.

ادامه مقاله به شکل زیر خواهد بود: مدلسازی ریاضی در بخش ۲ آمده است. در بخش ۳، مطالعه موردی و تحلیل نتایج صورت گرفته است. در بخش ۴ نیز نتیجه‌گیری نگارش شده است. مراجع در بخش ۵ آمده است.

۲- مدلسازی ریاضی

۲-۱- مدل بار حرارتی

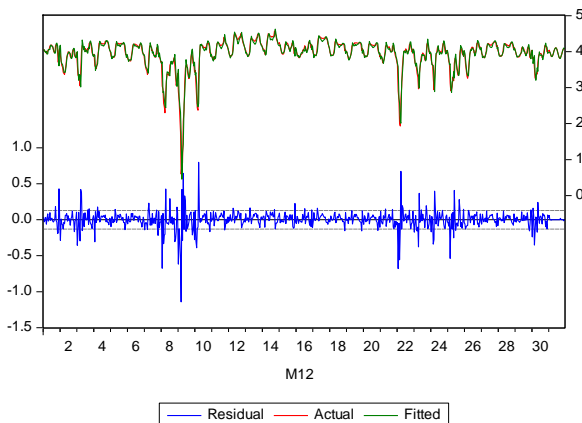
بارهای حرارتی را با روش‌های متفاوتی می‌توان مدل کرد. مدل باید از طرفی به قدر کافی مشتمل بر جزئیات باشد تا رفتار سیستم به دقت مدل کند، و از طرفی پیچیدگی زیادی نداشته باشد، تا بتوان روش‌های کنترلی را روی آن پیاده کرد [۱۹]. از طرفی، باید مدل کنترلی بتواند سیستم تهویه مطبوع را به طور مؤثری در پاسخگویی بار مشارکت دهد [۲۰]. در این پژوهش از یک مدل زمان‌گسسته استفاده شده است [۲۱]. همانطور که در [۲۱] آمده است بار حرارتی را می‌توان با یک معادله دیفرانسیل زمان گسسته که در رابطه ۱ بیان شده مدل‌سازی نمود.

$$\theta(k+1) = a\theta(k) + (1-a)(\theta_a(k) - m(k)\theta_g) + \varepsilon(k) \quad (1)$$

در رابطه ۱، $\theta(k)$: دمای داخلی سیستم تهویه مطبوع در گام زمانی k ام است. $k=1,2,3,\dots,N$ است؛ یعنی ۲۴ ساعت را به N بازه زمانی گسسته تقسیم کرده‌ایم. θ_a : دمای محیط و ε نویز است.

$m=1$ در صورتی دستگاه تهویه مطبوع روشن باشد و $m=0$ اگر دستگاه تهویه مطبوع خاموش باشد. در این پژوهش، دمای اتاق را با T_{amb} ، دمای مطلوب کاربر با T_{des} ، و

اختلاف این دو نمودار است؛ لذا قابل مشاهده است که اختلاف این دو داده همواره کمتر از یک درصد است.



شکل (۱): برآورد مدل قیمت برق و صحت‌سنجی با استفاده از Eviews

مدل بصورت ARMA(4,4) برآورد شده است و ضرایب آن به شرح جدول ۱ هستند:

جدول (۱): پارامترهای مدل آریما

AR(1)= 2.44775531111	MA(1)= - 1.17799864474
AR(2)= - 2.1030210833	MA(2)= 0.387084998226
AR(3)= 0.479501566091	MA(3)= - 0.0557325750631
AR(4)= 0.136003031644	MA(4)= 0.353097911849

و همچنین ضریب ثابت 3.94154897588 در مدل آریما لحاظ شده است. خطای MAPE کمتر از ۱٪ محاسبه شده است که قابل قبول است. داده‌ها مربوط به روز ۱ تا ۳۰ جولای هستند و پیش‌بینی برای روز ۳۱ جولای انجام شده است. به منظور مدل کردن عدم قطعیت برای قیمت در ابتدا ۳۰۰ سناریو تولید شد. سپس با استفاده از روش کاهش سناریو k-means [۲۴] تعداد سناریوها به ۵۸ سناریو کاهش یافت.

به منظور انتخاب تعداد سناریوی اولیه مناسب، تعداد سناریوهای مختلفی تولید شد و k-means روی سناریوهای تولیدشده اعمال شد. افزایش سناریوهای اولیه به مقدار بیش از ۳۰۰، تنها باعث می‌شد تا سناریوهای تکراری بیشتری تولید شوند که در روند عملکرد k-means حذف می‌شدند. شکل ۲ نشان‌دهنده تعداد سناریوهای مستقل بر حسب تعداد سناریوهای اولیه هستند.

باند مرده با Δ نشان داده شده‌اند. با این تفاسیر، می‌توان m را در هر لحظه از رابطه ۲ بدست آورد:

(۲)

$$m_{k+1} = U [m_k + U (T_{amb} - (T_{des} + \frac{\Delta}{2})) - U ((T_{des} - \frac{\Delta}{2}) - T_{amb})]$$

در رابطه فوق، U تابع پله است و مطابق رابطه زیر در نظر گرفته شده است:

$$\begin{cases} 1 & t > 0 \\ 0 & t \leq 0 \end{cases}$$

a از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$a = e^{-h/CR} \quad (۳)$$

که C ظرفیت گرمایی بار، R مقاومت گرمایی، و h گام زمانی شبیه‌سازی است. θ_g بهره حرارتی است، هنگامی که بار روشن است از رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$\theta_g = RP_{trans} \quad (۴)$$

که P_{trans} توان تبدیلی انرژی بار (مثبت برای بارهای سرمایشی، منفی برای بارهای گرمایشی) است. در این پژوهش، سیستم تهویه مطبوع، در مد سرمایشی مورد مطالعه قرار گرفته است؛ بدیهی است که همه موارد، در مد گرمایشی نیز مشابه خواهند بود. رابطه توان تبدیلی انرژی با توان الکتریکی مطابق رابطه ۵ به دست می‌آید.

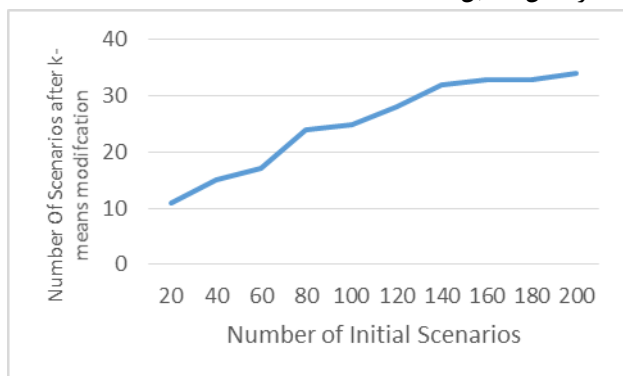
$$P = \frac{|P_{trans}|}{COP} \quad (۵)$$

COP ضریب تبادل گرمایی است.

۲-۲- پیش‌بینی قیمت برق

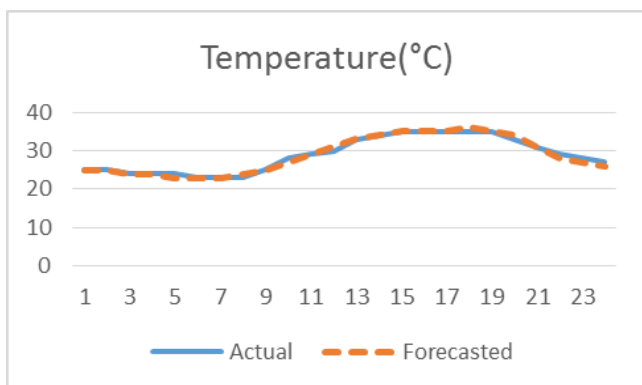
به منظور پیش‌بینی قیمت برق، از مدل آریما [۲۲] مبتنی بر سری زمانی جهت پیش‌بینی قیمت برق استفاده شده است. از آنجا که پیش‌بینی، با عدم قطعیت همراه است، با استفاده از مدل آریمای بدست‌آمده، باید سناریوهای مختلفی را برای قیمت برق تولید کنیم. برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت بازار زمان واقعی، از داده‌های بازار برق فرانسه در ماه جولای ۲۰۱۸ استفاده شده است [۲۳]. مدل آریما و پیش‌بینی‌ها با استفاده از نرم‌افزار Eviews 10.0 بدست آمده است. این نرم‌افزار دارای دقت بسیار بالایی است. داده واقعی و داده برازش‌شده با استفاده از مدل آریما، و خطای پیش‌بینی در شکل ۱ نمایش داده شده است. منحنی شکل ۱ داده‌های ۱ ماه را نشان می‌دهد. محور افقی نمایانگر ۳۱ روز هستند. نمودار قرمز، قیمت واقعی برق در این ۳۱ روز هستند. نمودار سبزرنگ، مدلی است که به وسیله نرم‌افزار ای‌ویوز تخمین زده شده است و همانطور که مشاهده می‌شود، به خوبی بر نمودار داده‌های واقعی قابل برازش است. نمودار آبی اختلاف داده‌های واقعی و داده‌های برازش‌شده را نشان می‌دهد. محور عمودی درصد

مشابه بخش ۲-۲ به منظور انتخاب تعداد سناریوی اولیه اتخاذ شده است که در شکل ۴ قابل مشاهده است.

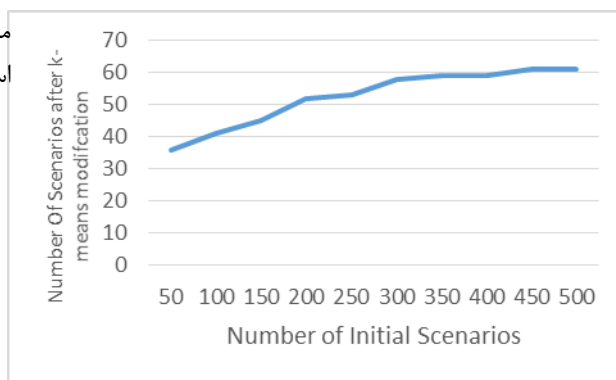


شکل (۴): تعداد سناریوهای مستقل بر حسب تعداد سناریوهای اولیه دمای هوا

دمای واقعی به وقوع پیوسته در روز ۳۱ جولای، در کنار یکی از سناریوهای تولیدشده توسط زنجیره مارکف، در شکل ۵ قابل مشاهده است.

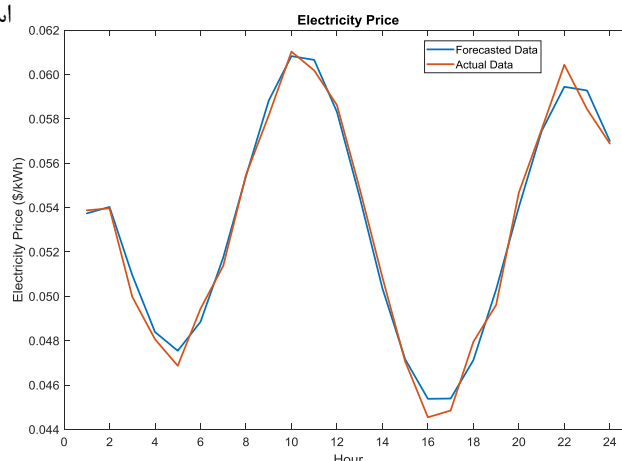


شکل (۵): دمای هوا واقعی و پیش‌بینی شده مارس، ۳۱ جولای ۲۰۱۸ [۲۵]



شکل (۶): تعداد سناریوهای مستقل بر حسب تعداد سناریوهای اولیه قیمت برق

نمودار قیمت برق در یکی از سناریوها و قیمت واقعی برق در این روز، مطابق شکل ۳ است.



شکل (۳): قیمت برق پیش‌بینی شده (نمودار آبی) و قیمت برق واقعی (نمودار قرمز) در روز ۳۱ جولای

۲-۴- تولید سناریوها

اگر تعداد ω_e سناریو برای قیمت برق و تعداد ω_t سناریو برای دمای هوا تولید شوند. تعداد کل سناریوها برابر است با:

$$\omega = (\omega_e, \omega_t)$$

که در این حالت، بطور مثال سناریو صفر عبارتست از:

$$\omega(0) = (\omega_e(0), \omega_t(0))$$

همانطور که در بخش‌های فوق مشاهده شد، تعداد ۵۸ سناریو قیمت برق و ۳۲ سناریو دمای هوا داریم. لذا در مجموع، ۱۸۵۶ سناریو داریم. یک بار دیگر با استفاده از روش k -means، تلاش می‌کنیم تا سناریوهای مشابه را حذف کنیم. بدین ترتیب مجموع سناریوها به ۱۶۲ سناریو کاهش می‌یابد.

۲-۳- پیش‌بینی دمای هوا

به منظور پیش‌بینی دمای هوا از زنجیره مارکف استفاده شده است. مارکف، یک مدل تصادفی است که با اتکا بر داده‌های پیشین، می‌تواند آینده را پیش‌بینی کند. مارکف برای پیش‌بینی پارامترهایی با وضعیت گسسته به کار می‌رود؛ در صورتی که سیستمی با n وضعیت داشته باشیم، هرگاه وضعیت سیستم در حالت i باشد، همواره با احتمال ثابتی ممکن است حالت بعدی آن سیستم، j باشد. این احتمال ثابت، از داده‌های پیشین به دست آمده است. بدین منظور دماهای ساعات مختلف شبانه‌روز در ماه جولای مد نظر قرار گرفته شده‌اند. مرحله بعد، برای تشکیل ماتریس گذر، باید بررسی شود از هر دما، به دمای دیگر چند بار انتقال وجود داشته است. سپس با استفاده از ماتریس گذار و اطلاعات روز ۳۰ جولای (روز پیش از برنامه‌ریزی) ۱۴۰ سناریو مختلف با استفاده از زنجیره مارکف تولید شد و با استفاده از روش k -means، تقلیل سناریو تا تعداد ۳۲ عدد انجام شد. استراتژی

۲-۵- معرفی تابع هزینه

هزینه برق مصرفی سیستم تهویه مطبوع تابعی از توان مصرفی آن در هر ساعت، میزان روشن بودن سیستم تهویه مطبوع در آن ساعت، و قیمت برق در آن ساعت است. بدین ترتیب، در طول یک بازه زمانی مشخص، می‌توان هزینه برق مصرفی یک سیستم تهویه مطبوع را به شکل رابطه ۶ در نظر گرفت.

$$\text{Cost} = \sum_{\omega \in \Omega} \text{Cost}(\omega) = \sum_{k=1}^N \sum_{\omega \in \Omega} [\pi_{\omega} e(k, \omega) p(k, \omega) m(k, \omega)] \quad (6)$$

π احتمال وقوع هر سناریو است. در رابطه ۶، $e(k, \omega)$ قیمت برق در بازه زمانی k و سناریو ω است. $P(k, \omega)$ توان مصرفی سیستم تهویه مطبوع در بازه زمانی k و سناریو ω است. m نیز همانطور که می‌دانیم وضعیت روشن یا خاموش بودن سیستم تهویه مطبوع در بازه زمانی k و سناریو ω را نشان می‌دهد.

۲-۶- معرفی معیار ریسک

در این پژوهش، از معیار ارزش در معرض ریسک مشروط (CVaR) برای مدلسازی ریسک پیش‌بینی قیمت برق و دمای هوا، کمک گرفته شده است. ارزش در معرض ریسک مشروط با سطح اطمینان α ، $CVaR_{1-\alpha}$ معادل سود مورد انتظار $(1-\alpha) \times 100\%$ بدترین سناریوهاست (بدترین سناریوها، سناریوهایی هستند که بیشترین هزینه را دارند). هدف، تعیین حداکثر هزینه، در شرایط نامطلوب است؛ به عبارتی، در بدترین حالت ممکن، کاربر چقدر هزینه خواهد کرد. شاخص CVaR مطابق رابطه ۷ محاسبه می‌شود [۲۶، ۲۷]:

$$CVaR_{1-\alpha}(f(x, y)) = \alpha + \frac{1}{p(1-\beta)} \sum_{s=1}^p f(x, y_s) \quad (7)$$

β سطح اطمینان، P تعداد سناریوها، x متغیر تصمیم، و y متغیر عدم اطمینان است که در این پژوهش، قیمت برق و دمای هوا هستند.

۲-۷- معرفی تابع هدف

بر مبنای تابع هزینه، دمای رفاه تعیین شده توسط کاربر و در نظر گرفتن شاخص CVaR، یک تابع بهینه‌سازی با هدف حداقل کردن هزینه برق مصرفی سیستم تهویه مطبوع، و قیود مسأله تعریف می‌شود.

Objective function: (8)

$$\text{Min } [Cost + \beta CVaR(Cost)]$$

s.t:

CVaR constraints:

$$\mu(\omega) \geq 0, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^{24} [Cost(\omega)] - \mu(\omega) - \eta \geq 0 \quad (10)$$

η کوچکترین مقدار است که تضمین می‌کند که احتمال آنکه

هزینه از CVaR بیشتر شود، کمتر مساوی $1-\alpha$ است. همچنین قید رابطه ۱۱ را برای عملکرد سیستم تهویه مطبوع باید در نظر گرفت.

$$T_{\min} \leq T_{\text{amb}} \leq T_{\max} \quad (11)$$

T_{\min} و T_{\max} حداقل و حداکثر دمای مجاز تعیین شده توسط کاربر هستند؛ این دما بنا بر میزان توجه فرد به رفاه، تعیین می‌شود. وجود این قید یعنی دمای خانه هیچگاه نباید از باند مجاز تعیین شده توسط کاربر خارج شود. با بررسی رابطه ۱۱ و رابطه ۲ همواره باید دو رابطه ۱۲ و ۱۳ صادق باشند:

$$T_{\text{des}} + \frac{\Delta}{2} \leq T_{\max} \quad (12)$$

$$T_{\text{des}} + \frac{\Delta}{2} \geq T_{\min} \quad (13)$$

همچنین باید توجه داشت با توجه به در نظر گرفتن سناریوهای مختلف، روابط ۱ و ۲ به شکل روابط ۱۴ و ۱۵ به روز می‌شوند:

$$\theta(k+1, \omega) = a\theta(k, \omega) + (1-a)(\theta_a(k, \omega) - m(k)\theta_g) \quad (14)$$

$$+ \varepsilon(k, \omega)$$

$$m_{k+1, \omega} = U [m_{k, \omega} + U (T_{\text{amb}}(\omega) - (T_{\text{des}} + \frac{\Delta}{2}))] \quad (15)$$

$$- U ((T_{\text{des}} - \frac{\Delta}{2}) - T_{\text{amb}}(\omega))]$$

۲-۸- حل مسأله با الگوریتم GWO

حال، با استفاده از داده‌های موجود، باید مسأله بهینه‌سازی رابطه شماره ۸ را حل کنیم. بدین منظور از الگوریتم GWO استفاده شده است. این الگوریتم در سال ۲۰۱۴ میلادی توسط میرجلیلی و همکاران در دانشگاه شهید بهشتی ارائه شد [۱۸]. این الگوریتم جزو الگوریتم‌های هوش جمعی است. گرگ‌های خاکستری موجوداتی هستند که به صورت نیمه دموکراسی زندگی می‌کنند و جایگاه هر گرگ در اجتماع آن‌ها پیداست. گرگ‌های خاکستری برای شکار کردن ابتدا دور طعمه حلقه زده و طعمه را محاصره می‌کند و به تنگ‌تر کردن حلقه محاصره شروع به خسته کردن طعمه می‌کنند سپس به صورت نوبتی و با دستور گرگ رهبر به طعمه حمله کرده و در نهایت طعمه را از پای در می‌آورند.

Alpha به عنوان رهبر گروه شناخته می‌شود. Beta نفر دوم گروه است و در مواقع اضطراب جایگزین Alpha می‌شود. Delta نیز دارای پایین‌ترین مرتبه در گروه است.

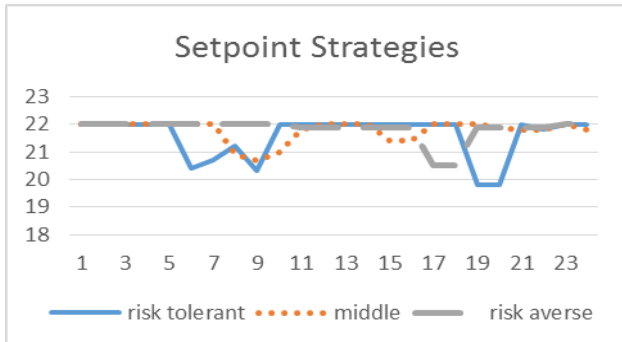
همان‌طور که اشاره شد، گرگ‌های خاکستری در طی فرآیند شکار، طعمه را محاصره می‌کنند. برای مدل کردن ساز و کار شکار، از الگوریتم و روابط زیر استفاده می‌شود:

۱- در هر تکرار، برازندگی کلیه جواب‌ها محاسبه شده و سه جواب برتر به عنوان alpha, beta, delta تا پایان الگوریتم انتخاب می‌شوند.

۲- در هر تکرار سه جواب برتر (گرگ‌های alpha, beta, delta) قابلیت تخمین موقعیت شکار را داشته و این

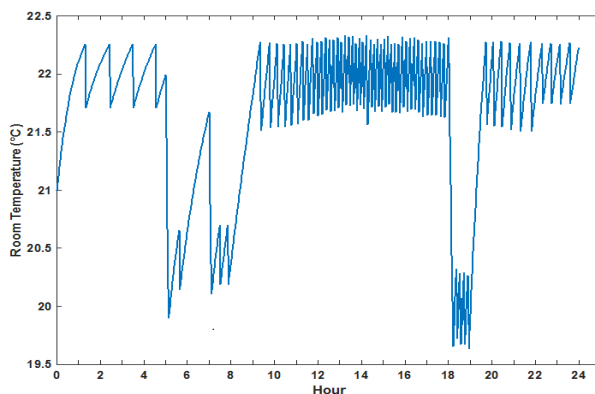
۳-۱- مطالعه موردی ۱

Δ برابر ± 0.25 درجه سانتی‌گراد تنظیم شده است. در این سناریو، نقطه تنظیم ترموستات در ۲۴ ساعت آینده به عنوان متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. نتیجه تنظیم نقطه تنظیم ترموستات برای ۳ کاربر ریسک‌پذیر، تا حدی ریسک‌پذیر و ریسک‌گریز در شکل ۶ آورده شده است.

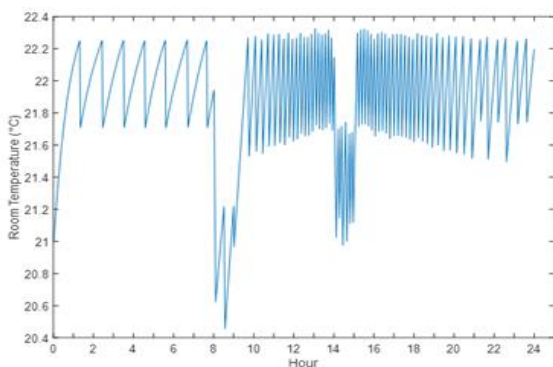


شکل (۶): تنظیم نقطه تنظیم ترموستات توسط کاربران با ریسک‌پذیری مختلف

یکی از سناریوها به عنوان مثال در نظر گرفته شده است که در صورت وقوع آن سناریو، دمای اتاق کاربر ریسک‌پذیر، تا حدی ریسک‌پذیر و ریسک‌گریز، به ترتیب در شکل‌های ۷ تا ۹ بدست آمده است. کاربر ریسک‌پذیر یعنی در رابطه ۸ باید β را برابر صفر قرار داد. برای کاربر تا حدی ریسک‌پذیر β برابر ۰.۵ قرار داده شده است و برای کاربر ریسک‌گریز β برابر یک فرض شده است.



شکل (۷): کاربر ریسک‌پذیر



شکل (۸): کاربر تا حدی ریسک‌پذیر

کار را در هر تکرار با استفاده از مجموعه روابط ۱۴ انجام می‌دهند.

در این روابط، t برابر تکرار الگوریتم، بردارهای A و C ضرایب بردار مکان طعمه (پاسخ بهینه)، و X بردار مکان گرگ خاکستری است. D فاصله طعمه و گرگ در هر تکرار است.

$$\begin{aligned} \overrightarrow{D_\alpha} &= \left| \overrightarrow{C_1} \cdot \overrightarrow{X_\alpha} - \overrightarrow{X} \right|, & \overrightarrow{D_\beta} &= \left| \overrightarrow{C_2} \cdot \overrightarrow{X_\beta} - \overrightarrow{X} \right|, \\ \overrightarrow{D_\delta} &= \left| \overrightarrow{C_3} \cdot \overrightarrow{X_\delta} - \overrightarrow{X} \right| \\ \overrightarrow{X_1} &= \overrightarrow{X_\alpha} - \overrightarrow{A_1}(D_\alpha), & \overrightarrow{X_2} &= \overrightarrow{X_\alpha} - \overrightarrow{A_2}(D_\alpha), \\ \overrightarrow{X_3} &= \overrightarrow{X_\alpha} - \overrightarrow{A_3}(D_\alpha) \\ \overrightarrow{X(t+1)} &= \frac{\overrightarrow{X_1} + \overrightarrow{X_2} + \overrightarrow{X_3}}{3} \end{aligned} \quad (14)$$

۳- در هر تکرار بعد از تعیین موقعیت گرگ‌ها، آپدیت موقعیت بقیه جواب‌ها با تبعیت از آنها انجام می‌شود.
۴- در هر تکرار بردار a (و به تبع آن A) و C آپدیت می‌شوند.

۵- در پایان تکرارها موقعیت گرگ α به عنوان نقطه بهینه معرفی می‌شود.

۳- مطالعه موردی و تحلیل نتایج

در این پژوهش، ۳ اندیس به منظور ارزیابی عملکرد سیستم تهویه مطبوع در نظر گرفته شده‌اند که عبارتند از:

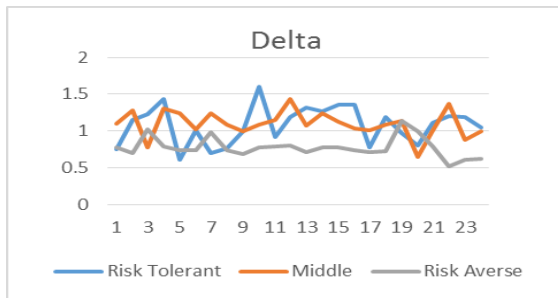
۱- P^1 : هزینه توان الکتریکی مصرف‌شده توسط سیستم تهویه مطبوع در یک روز
۲- EC^2 : انرژی مصرف‌شده توسط سیستم تهویه مطبوع در یک روز

۳- $ECPH^3$: میزان مصرف انرژی در ساعات پیک
با بررسی مطالعات موردی مختلف و بررسی ۳ اندیس معرفی‌شده، اثربخشی سیستم برنامه‌ریزی معرفی‌شده بررسی خواهد شد.

در مطالعات موردی ۱ و ۲، دمای تنظیم ترموستات مطلوب کاربر ۲۱ درجه سانتی‌گراد منظور شده است. همچنین حداکثر دمایی که کاربر مجاز می‌داند ۲۲/۵ درجه سانتی‌گراد، و حداقل دمای مجاز تعیین‌شده توسط کاربر ۱۹/۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شده است. پارامترهای دستگاه مطابق جدول شماره ۲ است.

جدول (۲): پارامترهای دستگاه تهویه مطبوع

$h(\text{Sec})$	۲
R ($^{\circ}\text{C}/\text{kW}$)	۲
C ($\text{kWh}/^{\circ}\text{C}$)	۲
P (W)	...



شکل (۱۱): تنظیم باند مرده-مطالعه موردی ۲

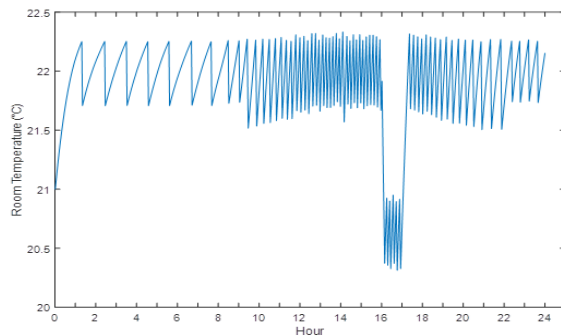
استراتژی نقطه تنظیم ترموستات، بسیار شبیه به مطالعه موردی ۱ است. در زمینه انتخاب باند مرده، کاربر ریسک‌گریز علاقه چندانی به تغییر باند مرده نداشته است و البته آن را روی نقطه تقریباً حداقلی ثابت نگه داشته است. کاربر ریسک‌پذیر، اولاً تقریباً در همه ساعات پهنای باند مرده را بالاتر از کاربر ریسک‌گریز انتخاب کرده است که این قضیه موجب صرفه‌جویی انرژی خواهد بود. ثانیاً در ساعات قبل از پیک، تا حد ممکن باند مرده را کوچک کرده است تا در لحظه ورود به ساعت پیک، دما قطعاً در نقطه پایینی باشد. کاربر تا حدی ریسک‌پذیر نیز تلفیقی از دو اتفاق فوق را رقم زده است.

۳-۳- مقایسه نتایج مطالعات موردی ۱ و ۲

به منظور درک بهتر نتایج حاصله از مطالعات موردی ۱ و ۲، جدول ۳ آورده شده است. مقادیر مذکور در ۳ ستون ابتدایی جدول ۳، میانگین کل سناریوها است. در راستای نتیجه‌گیری دقیق‌تر، بهتر است انحراف معیار هزینه مصرفی کاربر را نیز مد نظر قرار دهیم. همانطور که مشاهده می‌شود کاربر ریسک‌پذیر، انرژی کمتری در ساعات پیک استفاده کرده است و همچنین متحمل هزینه کمتری شده است. در ضمن همانطور که مشخص است تنظیم همزمان نقطه تنظیم ترموستات و پهنای باند مرده، نسبت به تنظیم نقطه تنظیم به تنهایی، راهکاری مؤثرتر است. ستون انحراف معیار نیز نشان می‌دهد که برای کاربرهای ریسک‌پذیرتر احتمال نوسان بیشتری وجود دارد و هزینه آنها می‌تواند دستخوش تغییراتی تا حدود ۱۰٪ بشود؛ این تغییر می‌تواند به نفع یا ضرر آنها باشد؛ اما برای کاربران ریسک‌گریز، این احتمال نوسان تنها ۳٪ است و احتمالاً هزینه آنها تغییرات چندانی با هزینه مدنظرشان نداشته باشد.

۳-۴- مطالعه موردی ۳

به منظور بررسی اثر دمای مطلوب کاربر بر پارامترهای عملکردی سیستم تهویه مطبوع، شبیه‌سازی‌های مطالعه موردی ۱، به ازای دمای مطلوب 22°C و 23°C تکرار شده است. از آنجا که هدف، مطالعه اثر دمای مطلوب کاربر بر پارامترهای خروجی مسأله است، شبیه‌سازی‌ها تنها برای کاربر تا حدی ریسک‌پذیر صورت گرفته

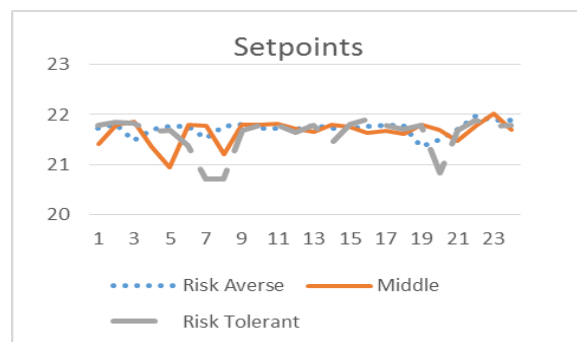


شکل (۹): کاربر ریسک‌گریز

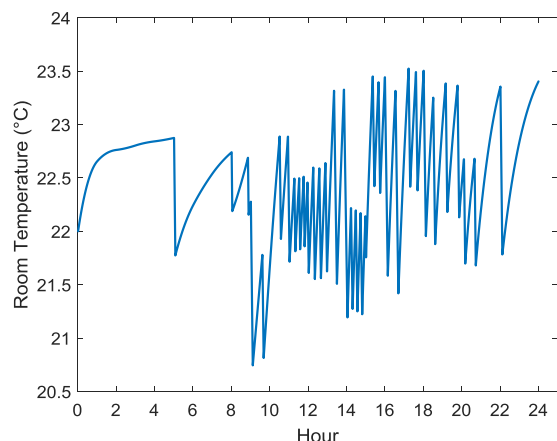
همانطور که مشاهده می‌شود کاربر ریسک‌پذیر، بیشترین واکنش را به قیمت‌ها داشته است و به عبارتی، بیشترین میزان مشارکت در پاسخگویی بار را داشته است. این کاربر در ساعات پیش از وقوع پیک، دما را تا حد قابل قبولی پایین آورده است تا در ساعات پیک، کمترین میزان روشن بودن سیستم تهویه مطبوع اتفاق افتد. واکنش کاربر تا حدی ریسک‌پذیر نیز تقریباً مشابه کاربر ریسک‌پذیر بوده است، با این تفاوت که اولاً این واکنش مقداری خفیف‌تر بوده است و دما در ساعات قبل از پیک، کمتر پایین آورده شده است و در ثانی به پیک دوم واکنش پیشگیرانه‌ای انجام نداده است و صرفاً در ساعات پیک دوم، نقطه تنظیم ترموستات را در بالاترین نقطه ممکن قرار داده است. نهایتاً کاربر ریسک‌گریز، از انجام واکنش پیشگیرانه خودداری کرده است و صرفاً تلاش کرده است تا در ساعات غیرپیک (دره مصرف انرژی) مقداری دما را پایین‌تر آورد و در سایر ساعات و به خصوص ساعات پیک، دما را در حداکثر دمای ممکن تنظیم کند.

۳-۲- مطالعه موردی ۲

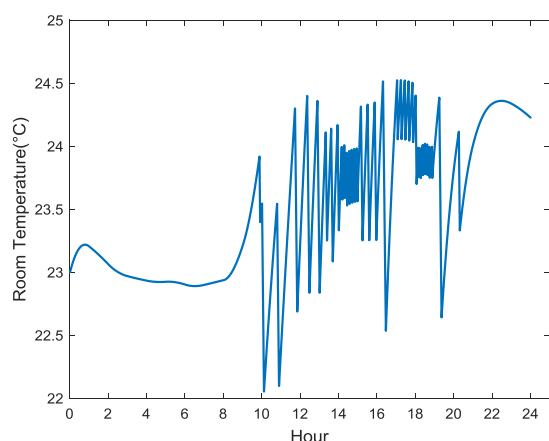
در این حالت، Δ مجاز بین $0.3^{\circ}\text{C} \pm$ تا $1^{\circ}\text{C} \pm$ قابل تنظیم در نظر گرفته شده است. در این سناریو، نقطه تنظیم ترموستات و Δ در ۲۴ ساعت آینده، به عنوان متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. نقطه تنظیم ترموستات و تنظیم باند مرده، در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آمده است.



شکل (۱۰): نقطه تنظیم ترموستات - مطالعه موردی ۲



شکل (۱۲): دمای اتاق کاربر تا حدی ریسک‌پذیر - مطالعه موردی ۳ - دمای مطلوب کاربر ۲۲°C است



شکل (۱۳): دمای اتاق کاربر تا حدی ریسک‌پذیر - مطالعه موردی ۳ - دمای مطلوب کاربر ۲۳°C است

بررسی اثر دمای مطلوب کاربر بر پارامترهای ارزیابی عملکرد سیستم تهویه مطبوع در جدول ۴ آورده شده است.

جدول (۴): بررسی اثر دمای مطلوب کاربر بر پارامترهای عملکردی سیستم

دمای مطلوب کاربر (درجه سانتی-گراد)	P(€)	EC(kWh)	ECPH(kWh)
۲۱	0.998	12.37	2.15
۲۲	0.898	11.02	1.98
۲۳	0.819	10.27	1.89

است. یکی از سناریوها به عنوان مثال در نظر گرفته شده است که در صورت وقوع آن سناریو، دمای اتاق کاربر تا حدی ریسک‌پذیر در صورت انتخاب دمای ۲۲°C و ۲۳°C به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ بدست آمده است.

جدول (۳): مقایسه نتایج مطالعات موردی

	P(€)	EC(kWh)	ECPH(kWh)	Std of P
تنظیم نقطه تنظیم ترموستات - کاربر ریسک‌پذیر	0.987	12.43	2.01	0.105
تنظیم نقطه تنظیم ترموستات - کاربر تا حدی ریسک‌پذیر	0.998	12.37	2.15	0.068
تنظیم نقطه تنظیم ترموستات - کاربر ریسک‌گریز	1.081	12.16	2.26	0.033
تنظیم همزمان نقطه تنظیم ترموستات و Δ کاربر ریسک‌پذیر	0.976	12.28	1.97	0.112
تنظیم همزمان نقطه تنظیم ترموستات و Δ کاربر تا حدی ریسک‌پذیر	0.984	12.17	2.03	0.074
تنظیم همزمان نقطه تنظیم ترموستات و Δ کاربر ریسک‌گریز	1.012	12.09	2.18	0.036

لذا، قابل مشاهده است که هزینه کاربر و انرژی مصرفی وی، کاهش قابل توجهی داشته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با پیش‌بینی قیمت برق و دمای هوا در روز آینده، برنامه‌ریزی بهینه ۲۴ ساعته برای سیستم‌های تهویه مطبوع صورت گرفت. این برنامه‌ریزی با هدف حداقل کردن هزینه کاربران صورت گرفت؛ با توجه به عدم قطعیت پیش‌بینی قیمت برق و دمای هوا، ریسک این پیش‌بینی‌ها مدلسازی شد و سه دسته کاربر با نگرش‌های مختلف به ریسک در نظر گرفته شدند. نتایج شبیه‌سازی‌های نشان می‌دهد برنامه‌ریزی نقطه تنظیم ترموستات می‌تواند راهکار مؤثری در راستای مشارکت سیستم‌های تهویه مطبوع در پاسخگویی بار و کاهش هزینه کاربران باشد. کاربران ریسک‌پذیرتر مشارکت بیشتری در پاسخگویی بار دارند و هزینه کمتری نیز پرداخت می‌کنند. همچنین نشان داده شد برنامه‌ریزی توأمان نقطه تنظیم ترموستات و پهنای باند متقارن، نسبت به تنظیم تکی نقطه تنظیم ترموستات، راهکار مؤثرتری است. همچنین مشاهده شد که با هر درجه افزایش دمای مطلوب کاربر، می‌توان حدود ۱۰٪ در مصرف انرژی و هزینه صرفه‌جویی کرد.

مراجع

- [۱] زارعی ابراهیم، محمدیان محسن، قروه‌یسی علی‌اکبر، "مشارکت پاسخ بار در برنامه‌ریزی تولید نیروگاه‌ها"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳ (۳)، ۷۳-۸۲، ۱۳۹۵.
- [۲] سلمانی سعید، جدید شهرام، "بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع هوشمند در حضور منابع انرژی پراکنده"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳ (۳)، ۱-۱۰، ۱۳۹۶.
- [۳] کریمی حمید، جدید شهرام، "طراحی قیمت زمان حقیقی با در نظرگیری عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر و بارهای حرارتی در شبکه‌های هوشمند"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۶ (۱)، ۱-۱۰، ۱۳۹۸.
- [4] C. Jin, C. Yan and R. Tang, "A Compound HVAC-Based Demand Response Method for Urgent Responses of Commercial Buildings Towards Smart Grids", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 238, p. 012064, 2019.
- [5] A. Keshtkar, S. Arzanpour, F. Keshtkar and P. Ahmadi, "Smart residential load reduction via fuzzy logic, wireless sensors, and smart grid incentives", Energy and Buildings, vol. 104, pp. 165-180, 2015.
- [6] W. Zhang, J. Lian, C. Chang and K. Kalsi, "Aggregated Modeling and Control of Air Conditioning Loads for Demand Response", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 4, pp. 4655-4664, 2013.
- [7] N. Lu, "An Evaluation of the HVAC Load Potential for Providing Load Balancing Service", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 3, pp. 1263-1270, 2012.
- [8] A. Molina, A. Gabaldon, J. Fuentes and C. Alvarez, "Implementation and assessment of physically based electrical load models: application to direct load control

۳-۵- مقایسه روش پیشنهادی پژوهش با دیگر

روش‌ها

مرجع [۱۷] به بررسی برنامه‌ریزی بهینه مصرف انرژی سیستم‌های تهویه مطبوع با روشی به نام DROA پرداخته است. در این مطالعه ریسک پیش‌بینی دمای هوا مد نظر قرار گرفته است، اما، قیمت برق بصورت قطعی در نظر گرفته شده است. در این بخش، نتایج [۱۷] با نتایج حاصل از این پژوهش مقایسه شده است تا اثرگذاری روش پیشنهادی این مقاله مورد ارزیابی قرار گیرد. لازم به ذکر است که از داده‌های [۱۷] به منظور شبیه‌سازی در این بخش کمک گرفته شده است. قیمت برق مطابق جدول ۵ است.

جدول (۵): قیمت برق

زمان	12 am-2am	2am-6am	6am-10am	10am-12pm
قیمت برق (\$/kWh)	0.00493	0.00493	0.05040	0.05040
زمان	12pm-2pm	2pm-8pm	8pm-10pm	10pm-12am
قیمت برق (\$/kWh)	0.05040	0.09761	0.05040	0.00493

مشخصات سیستم تهویه مطبوع نیز، مطابق جدول ۶ در نظر گرفته شده است.

جدول (۶): مشخصات سیستم تهویه مطبوع

R (°F/kW)	۱۳.۵
C (kWh/°F)	۰.۳۳
P (W)	۱۷۵۰

دمای مطلوب کاربر ۷۰ درجه فارنهایت فرض شده است. داده‌های آب و هوا مطابق با [۱۷] از [۲۸] استخراج شده است و سناریوهای لازم تولید شده است. میزان انرژی مصرفی و هزینه انرژی مصرفی سیستم تهویه مطبوع، در صورت اعمال روش [۱۷] و در صورت اعمال روش این پژوهش برای یک کاربر تا حدی ریسک‌پذیر، مطابق جدول ۷ است. باید توجه داشت که کلیه شبیه‌سازی‌ها و نتایج برای ۱۲ ساعت (۱۲ ظهر تا ۱۲ شب) ارائه گردیده است.

جدول (۷): مقایسه هزینه و انرژی مصرفی روش پیشنهادی

با [۱۷]

	P(\$)	EC(kWh)
روش M1 [۱۷]	0.809	11.38
روش M2 [۱۷]	0.811	11.39
روش M3 [۱۷]	0.815	11.41
روش پیشنهادی این پژوهش	0.798	11.17

- solar radiation forecasting", *Solar Energy*, vol. 163, pp. 189-199, 2018.
- [25] Weather in July 2016 in Paris, Île-de-France, France", Timeanddate.com, 2020. [Online]. Available: <https://www.timeanddate.com/weather/france/paris/historic?month=7&year=2016>. [Accessed: 07- Apr- 2020].
- [26] A. Balbás, B. Balbás and R. Balbás, "Differential equations connecting VaR and CVaR", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 326, pp. 247-267, 2017.
- [27] R. Rockafellar and S. Uryasev, "Conditional value-at-risk for general loss distributions", *Journal of Banking & Finance*, vol. 26, no. 7, pp. 1443-1471, 2002.
- [28] Weather Underground, The outdoor temperature in Austin 2013 [Online]. Available: <https://www.wunderground.com/history/airport/KATT/2013/8/6/>.
- residential programmes", *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, no. 1, p. 61, 2003.
- [9] A. Alahäivälä, J. Corbishley, J. Ekström, J. Jokisalo and M. Lehtonen, "A control framework for the utilization of heating load flexibility in a day-ahead market", *Electric Power Systems Research*, vol. 145, pp. 44-54, 2017.
- [10] J. Wang, G. Huang, Y. Sun and X. Liu, "Event-driven optimization of complex HVAC systems", *Energy and Buildings*, vol. 133, pp. 79-87, 2016.
- [11] H. Asad, R. Yuen and G. Huang, "Multiplexed real-time optimization of HVAC systems with enhanced control stability", *Applied Energy*, vol. 187, pp. 640-651, 2017.
- [12] A. Arabali, M. Ghofrani, M. Etezadi-Amoli, M. Fadali and Y. Baghzouz, "Genetic-Algorithm-Based Optimization Approach for Energy Management", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 162-170, 2013.
- [13] D. Molina, C. Lu, V. Sherman and R. Harley, "Model Predictive and Genetic Algorithm-Based Optimization of Residential Temperature Control in the Presence of Time-Varying Electricity Prices", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1137-1145, 2013.
- [14] S. Noh, J. Yun and K. Kim, "An efficient building air conditioning system control under real-time pricing", in *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, 2011, pp. 1283-1286..
- [15] Y. Zhang, P. Zeng and C. Zang, "Multi-objective optimal control algorithm for HVAC based on particle swarm optimization.", in *Fifth International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, 2014..
- [16] Y. Chen, F. Luo, Z. Dong, K. Meng, G. Ranzi and K. Wong, "A day-ahead scheduling framework for thermostatically controlled loads with thermal inertia and thermal comfort model", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 568-578, 2018.
- [17] Y. Du, L. Jiang, C. Duan, Y. Li and J. Smith, "Energy Consumption Scheduling of HVAC Considering Weather Forecast Error Through the Distributionally Robust Approach", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 3, pp. 846-857, 2018.
- [18] S. Mirjalili, S. Mirjalili and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer", *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014.
- [19] A. Afram and F. Janabi-Sharifi, "Review of modeling methods for HVAC systems", *Applied Thermal Engineering*, vol. 67, no. 1-2, pp. 507-519, 2014.
- [20] A. Molina-Garcia, M. Kessler, J. Fuentes and E. Gomez-Lazaro, "Probabilistic Characterization of Thermostatically Controlled Loads to Model the Impact of Demand Response Programs", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 241-251, 2011.
- [21] Mathieu. J. L., "Modeling, analysis, and control of demand response resources", Ph. D, University of California, Berkeley, 2012..
- [22] J. Contreras, R. Espinola, F. Nogales and A. Conejo, "ARIMA models to predict next-day electricity prices", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 1014-1020, 2003.
- [23] "Home | EPEX SPOT", [Epexspot.com](https://www.epexspot.com), 2020. [Online]. Available: <https://www.epexspot.com/en/market-ata/dayaheadauction>. [Accessed: 07- Apr- 2020].
- [24] S. Sun, S. Wang, G. Zhang and J. Zheng, "A decomposition-clustering-ensemble learning approach for

زیر نویس‌ها

¹ Price

² Energy Consumption

³ Energy Consumption in Peak Hours

