



Computational Intelligence in Electrical Engineering  
Vol. 15, No. 04, 2025  
pp. 99- 114  
Research Paper

## Multi-Objective Energy Management in a Microgrid with Smart Buildings Based on Cloud-Fog Computing

Moslem Dehghani <sup>1</sup>, Seyyed Mohammad Bornapour <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

### Abstract:

With the increase in the number of locally distributed generation resources and the increase of smart buildings in today's microgrids, the computational volume and data exchanged between units have increased. Therefore, it is necessary to perform on-site calculations and send the final information to the upstream layer for decision-making and planning. This paper presents a cloud-fog computing structure that reduces the computational burden and time of calculations for energy management of smart buildings in the smart microgrids. The proposed system has several smart buildings, each with fixed and shiftable loads, an energy storage system, and a photovoltaic system. In the proposed energy management of smart buildings, the cost and peak-to-average ratio are presented as objective functions in a multi-objective problem. Every smart building can buy and sell energy with the upstream network. Whale optimization algorithm has been used to solve the optimization problem and the cost and peak-average ratio have been reduced and optimized simultaneously. By implementing cloud-fog computing and solving the optimization problem of each smart building locally, the computational burden and computing time have been reduced from 465.46 seconds to 48.52 seconds compared to the case without cloud-fog structure. Therefore, cloud-fog computing has reduced the computational burden and the time of calculations in the proposed energy management system of each smart building, after which the planning of the units is done locally.

**Keywords:** Whale Optimization Algorithm, Microgrid, Smart Building, Cloud-Fog Computing, Energy management.



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



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2025.143424.1713>

## مدیریت انرژی چندهدفه در یک ریزشبكة با ساختمان‌های هوشمند

بر مبنای محاسبات ابر - مه

مسلم دهقانی<sup>۱</sup>، سید محمد برناپور<sup>۲\*</sup>

۱- پژوهشگر پسادکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

dehghani.kau@gmail.com

۲- دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

mbornapour@yu.ac.ir

**چکیده:** با افزایش تعداد منابع تولید پراکنده محلی و افزایش ساختمان‌های هوشمند در ریزشبكة‌های امروزی، بار محاسباتی و داده‌های مبادله‌شده بین واحدها افزایش یافته است؛ از این رو، انجام محاسبات در محل و ارسال اطلاعات نهایی به شبکه بالادست برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی امری ضروری است. در این مقاله، روشی بر مبنای ابر - مه ارائه شده است که حجم و زمان محاسبات را برای مدیریت انرژی ساختمان‌های هوشمند در ریزشبكة کاهش می‌دهد. سیستم پیشنهادی دارای چندین ساختمان هوشمند است که هر ساختمان هوشمند دارای بارهای ثابت و قابل‌تغییر، سیستم ذخیره‌ساز انرژی و سیستم فتوولتائیک است. در مدیریت انرژی ساختمان‌های هوشمند، دو هدف هزینه و نرخ پیک به میانگین در مسئله چندهدفه ارائه شده است. هر ساختمان هوشمند قابلیت خرید و فروش انرژی با شبکه بالادست را دارد. الگوریتم بهینه‌سازی وال برای حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی و کاهش هم‌زمان هزینه و نرخ پیک به میانگین استفاده شده است. با انجام محاسبات ابر - مه و حل مسئله بهینه‌سازی هر ساختمان هوشمند به صورت محلی، حجم محاسبات و زمان محاسبات نسبت به حالت بدون ساختار ابر - مه، از ۶۶۶۵/۶۶ ثانیه به ۴۸/۵۲ ثانیه کاهش یافته است؛ بنابراین، محاسبات لبه سبب کاهش حجم و زمان محاسبات در مدیریت انرژی چندین ساختمان هوشمند شده است که در پی آن، برنامه‌ریزی واحد‌ها به صورت محلی انجام می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم بهینه‌سازی وال، ریزشبكة، ساختمان هوشمند، محاسبات ابر - مه، مدیریت انرژی.

### ۱- مقدمه

جریان برق دوطرفه نیست؛ از این رو، ریزشبكة‌ها<sup>۱</sup> که اینترنت اشیا<sup>۲</sup>، فناوری‌های کنترل مدرن، فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات<sup>۳</sup>، جریان برق دوطرفه و هیبریدی را در خود جاداده‌اند، به عنوان شبکه الکتریکی هوشمند<sup>۴</sup> توسعه یافته‌اند. ریزشبكة‌ها برای پاسخ به افزایش تقاضای انرژی، دو برنامه پاسخ به تقاضا<sup>۵</sup> برای مدیریت انرژی و نصب نیروگاه جدید برای تولید انرژی را ارائه می‌دهند [۲].

در برنامه‌های پاسخ به تقاضا، یکی از چالش‌ها نبود اطلاعات کافی کاربران است که در پی آن، کاربران را از مشارکت بازمی‌دارد [۳]. یکی از راه‌حل‌های نوین برای حل این مسئله سیستم مدیریت انرژی هوشمند<sup>۶</sup> و حل مسئله بهینه‌سازی به صورت محلی در محل‌های کاربران است. با

با رشد سریع جمعیت و توسعه اقتصادی، وابستگی به انرژی الکتریکی روز به روز در حال افزایش است که در پی آن، مصرف انرژی نیز افزایش یافته است [۱]. شبکه برق سنتی قادر به پاسخ به افزایش تقاضای انرژی و چالش‌های ایجادشده همچون تولید هیبریدی، ارتباطات دوطرفه و

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۴

نام نویسنده مسئول: سید محمد برناپور

نشانی نویسنده مسئول: ایران، یاسوج، دانشگاه یاسوج، دانشکده

فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق

خانه‌های هوشمند<sup>۴</sup> ارائه شده است که انرژی مورد نیاز بارها را به صورت جداگانه کنترل می‌کنند. در مرجع [۹]، یک سیستم مدیریت انرژی برای ساختمان هوشمند با سیستم ذخیره‌ساز انرژی اجرا شده است. در [۱۰]، یک مدل مبتنی بر یادگیری عمیق<sup>۱۵</sup> برای افزایش عملکرد کوتاه‌مدت ریزشبهه‌ها با هدف به حداقل رساندن هم‌زمان هزینه‌های عملیاتی و انتشار آلودگی در حضور منابع انرژی توزیع شده برای مدیریت سمت تقاضا معرفی شده است.

در مرجع [۱۱]، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۱۶</sup> برای بهینه‌سازی مصرف انرژی لوازم خانگی با قابلیت جابه‌جایی زمان استفاده شده است. در مرجع [۱۲]، سیستم مدیریت انرژی برای مدیریت مصرف انرژی لوازم خانگی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری<sup>۱۷</sup> و الگوریتم ژنتیک<sup>۱۸</sup> بررسی شده است؛ اما سیستم ذخیره‌ساز انرژی و زمان‌بندی قابل تغییر انرژی بررسی نشده است. در مرجع [۱۳]، یک سیستم مدیریت انرژی برای به حداقل رساندن هزینه انرژی و نرخ استفاده از منابع انرژی نو به میانگین ارائه شده است. همچنین، از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. در [۱۴]، از الگوریتم جغرافیای زیستی<sup>۱۹</sup> مبتنی بر سطح پرتو برای برنامه‌ریزی لوازم خانگی<sup>۲۰</sup> استفاده شده است. دو تابع هدف هزینه و نسبت پیک به میانگین<sup>۲۱</sup> در مسئله به حداقل رسیده‌اند. سیستم پیشنهادی دارای سیستم ذخیره‌ساز انرژی، سیستم فتوولتائیک و توربین بادی است و همچنین، با شبکه بالادست تبادل انرژی برای خرید و فروش انرژی دارد.

در [۱۵]، به منظور تقویت امنیت شبکه‌های توزیع با چندین ریزشبهه، یک رویکرد کارآمد دو مرحله‌ای سلسله‌مراتبی با استفاده بهینه از منابع ذخیره‌ساز انرژی و برنامه‌های مدیریت مصرف ارائه شده است. در مرحله اول، حادثه و تأثیر آن بر شبکه توزیع مدل‌سازی شده است و سپس در مرحله دوم، اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی برای افزایش آمادگی سیستم و کاهش خسارت‌های ناشی از رویدادهای شدید انجام شده‌اند. در این مقاله، عدم قطعیت و ریسک ناشی از رویدادها در مسئله با استفاده از بهینه‌سازی استوار<sup>۲۲</sup> در نظر گرفته شده است. در [۱۶]، نویسندگان انعطاف‌پذیری فضایی سیستم ذخیره‌سازی انرژی

اجرای سیستم مدیریت انرژی با اینترنت اشیا، هزینه انرژی مصرف‌کننده به حداقل می‌رسد که انگیزه‌ای برای کاربران نهایی برای شرکت در برنامه‌های پاسخ به تقاضا است [۴]. خروجی سیستم مدیریت انرژی برنامه‌ریزی بهینه زمان استفاده لوازم خانگی، شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، خرید و فروش انرژی ساختمان‌های هوشمند<sup>۷</sup> و منابع انرژی تجدیدپذیر<sup>۸</sup> است [۵]. سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی<sup>۹</sup> برای ذخیره انرژی از منابع انرژی تجدیدپذیر در طول روز و تخلیه انرژی در طول شب و همچنین، بازه‌های زمانی که در آن‌ها هزینه انرژی زیاد است، برای تأمین انرژی مورد نیاز ساختمان‌های هوشمند و همچنین فروش انرژی به کار برده می‌شوند.

در طول دهه گذشته، با ظهور محاسبات ابری<sup>۱</sup>، مدیریت داده‌های اینترنتی به طرز چشمگیر بهبود یافته است و همچنین، تجمیع و اشتراک‌گذاری داده‌ها حل شده است. با گسترش فناوری اینترنت اشیا و محبوبیت بیشتر آن، تجهیزات هوشمند و تقاضای خدمات مرتبط به سرعت افزایش یافته‌اند. جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها در اینترنت اشیا به عنوان یک نیاز ضروری است. اینترنت اشیا به پهنای باند بالا، قدرت محاسباتی زیاد، مدیریت داده و سرعت پاسخ‌گویی سریع نیاز دارد که در آن، رایانش ابری نمی‌تواند این الزامات را برآورده کند؛ زیرا به شدت به سرورهای ابری متمرکز متکی است. برای غلبه بر این محدودیت، مفاهیم محاسبات لبه<sup>۱۱</sup> و محاسبات مه<sup>۱۲</sup> به عنوان طرح‌های محاسباتی جدید ارائه شده‌اند. عملکرد شبکه را می‌توان با استفاده از منابع آزاد محاسباتی توزیع شده واقع در لبه بهبود بخشید. سیستم‌های اینترنت اشیا مبتنی بر مه و محاسبات لبه که طرحی جدید هستند، می‌توانند خدماتی بهتر ارائه دهند [۶].

در مدیریت سمت تقاضا، تکنیک‌ها و الگوریتم‌هایی مختلف برای به حداقل رساندن هزینه صورت‌حساب انرژی بر اساس تعرفه‌ها و مشوق‌ها اتخاذ شده‌اند. مصرف‌کنندگان می‌توانند انرژی تجدیدپذیر را برای تأمین انرژی وسایل خود به کار گیرند و در صورت تولید مازاد انرژی در طول روز، آن را به شبکه برق بفروشند [۷]. یک رویکرد جدید از هاب انرژی<sup>۱۳</sup> در [۸] برای مدیریت سمت تقاضا در

تعبیه شده در وسایل نقلیه را برای پر کردن شکاف بین برنامه ریزی بهینه اقتصادی در طول عملیات نرمال و مکان‌هایی که در آن‌ها به دلیل تقاضای زیاد ظرفیت پشتیبان اضافی مورد نیاز است، بررسی کرده‌اند. در این مقاله، یک چارچوب بهینه‌سازی دومارحله‌ای ارائه شده است که در ابتدا، سرمایه‌گذاری در مازول‌های سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار را به حداکثر می‌رساند و در مرحله دوم، امکان مسیریابی مجدد وسایل نقلیه را برای ایجاد ریزشبکه‌های پویا و جلوگیری از کاهش بار پیش‌بینی‌شده ناشی از رویدادها فراهم می‌کند. در [۱۷]، یک برنامه‌ریزی دومارحله‌ای برای بررسی انعطاف‌پذیری در طراحی یک ریزشبکه متشکل از پنل‌های خورشیدی، میکروتوربین‌ها و باتری‌های متحرک معرفی شده است تا انعطاف‌پذیری سیستم را در برابر رویدادها با تأثیر زیاد افزایش دهد. در چارچوب پیشنهادی، به منظور افزایش انعطاف‌پذیری سیستم تصمیم‌های سرمایه‌گذاری در مرحله اول اتخاذ می‌شوند و سپس در مرحله دوم، متغیرهای عملیاتی بهینه می‌شوند.

نویسندگان در مرجع [۱۸] برای توسعه مفهوم ریزشبکه‌ها از اینترنت انرژی<sup>۳۳</sup> استفاده کردند تا راه‌حلی را برای مدیریت سمت تقاضا پیشنهاد کنند. در این مرجع، استفاده از یک کانال ارتباطی هوشمند در میان لایه‌های ابر و مه<sup>۲۴</sup> به منظور کاهش تأخیر پردازش فرض شده است. این دستگاه‌ها با توجه به اهمیت و سیاست‌های مصرف‌کننده و همچنین، موقعیت‌های منابع انرژی در یک ردیف اولویت پویا مرتب شده‌اند. طرح مدیریت انرژی بر پایه ساختار محاسبات مه در مرجع [۱۹] ارائه شده است. طرح آن‌ها به آخرین کاربر این امکان را می‌دهد که طرح مدیریت انرژی را برای کاهش هزینه اجرا کند. مرجع [۲۰]، یک ساختار ابر - مه را بر اساس سه لایه ارائه می‌کند تا تلفات انرژی را به حداقل برساند و انرژی مازاد را متعادل کند. مدلی از یک ساختار ابر - مه برای مدیریت منابع در مرجع [۲۱] ارائه شده است که یک چارچوب سلسله‌مراتبی محاسبات ابر - مه<sup>۲۵</sup> را به منظور آماده‌سازی انواع خدمات محاسباتی در ریزشبکه توصیف می‌کند.

در این مقاله، یک مدل محاسباتی ابر - مه برای یک

ریزشبکه با ساختمان‌های هوشمند ارائه شده است تا به دنبال آن، حجم محاسبات و زمان محاسبات در ریزشبکه کاهش یابد. در این مدل، هر ساختمان هوشمند به عنوان یک گره (لایه مه) در نظر گرفته شده است که به طور مستقل قابلیت مدیریت انرژی را دارد. در طرح پیشنهادی، هر لایه مه توانایی مدیریت توزیع شده و تصمیم‌گیری را دارد. در هر لایه مه، داده‌های مصرف لوازم، تولید توان سیستم فتوولتائیک و سطح شارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی از لایه لبه به دست می‌آید و سپس مدیریت انرژی اجرا می‌شود و در ادامه زمان روشن و خاموش بودن لوازم، میزان فروش انرژی، میزان خرید انرژی، مقدار شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی تعیین می‌شود. همچنین، داده‌ها به گره بعدی که در سطح سلسله‌مراتبی بالاتر قرار دارد، برای پردازش و تصمیم‌گیری در لایه بالاتر (ابر) منتقل می‌شود. هدف اجرای محاسبات ابر - مه، کاهش حجم و زمان محاسباتی است که در پی آن، داده‌های پیش پردازش شده در لایه‌های پایین در لایه ابر به منظور تجزیه و تحلیل و مدیریت کل ریزشبکه جمع‌آوری می‌شود. به صورت خلاصه، نوآوری اصلی مقاله به شرح زیر بیان می‌شود:

- اجرای طرح محاسبات ابر - مه در ریزشبکه با چندین ساختمان هوشمند.
- کاهش حجم و زمان محاسبات مدیریت انرژی ریزشبکه.
- مدل‌سازی مسئله مدیریت انرژی ساختمان‌های هوشمند در یک مسئله دوهدفه به منظور کاهش هزینه و نرخ پیک به میانگین.
- در نظر گرفتن سیستم فتوولتائیک، سیستم ذخیره‌ساز انرژی به صورت هم‌زمان در ساختمان‌های هوشمند.
- خرید و فروش انرژی با شبکه بالادست.
- حل مسئله بهینه‌سازی دوهدفه پیشنهادی با الگوریتم بهینه‌سازی وال<sup>۲۶</sup>.

ادامه مقاله به این شرح است: در بخش دوم، سیستم مورد مطالعه که یک ریزشبکه با چندین ساختمان هوشمند است، شرح داده شده است. مدل ریاضی مسئله و اهداف و قیود مسئله بهینه‌سازی با دو هدف هزینه و نرخ پیک به میانگین در قسمت سوم ارائه شده‌اند. مفاهیم محاسبات ابر -

هزینه و نرخ پیک به میانگین ارائه می‌شود و سپس قیود مسئله و مدل سیستم فتولتائیک، سیستم ذخیره‌ساز انرژی و بارهای ثابت و قابل تغییر بیان می‌شوند.

### ۳-۱- اهداف مسئله

مسئله مدیریت انرژی پیشنهادی به عنوان یک مسئله دوهدفه مدل‌سازی می‌شود. در این مدل، زمان استفاده و خاموش بودن بارهای ساختمان هوشمند با متغیرهای عدد صحیح باینری نشان داده می‌شود و زمان روشن و خاموش بودن این بارها قابل تغییر است. همچنین، متغیرهای پیوسته نشان‌دهنده توان مورد نیاز و تولیدی بارها، سیستم فتولتائیک و سیستم ذخیره‌ساز انرژی هستند.

هزینه انرژی مصرفی و نرخ پیک بار به میانگین به عنوان اهداف اولیه این مقاله در نظر گرفته شده‌اند. فرمول-بندی اولین هدف مسئله پیشنهادی (هزینه) به صورت زیر بیان شده است:

$$CF_1 = \min Cost_{Total}(t) \quad (1)$$

$$= Cost_{Bought} - Cost_{Sale}$$

که در آن، هزینه کل برابر هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست ( $Cost_{Bought}$ ) منهای درآمد حاصل از فروش انرژی به شبکه بالادست ( $Cost_{Sale}$ ) است. انرژی تولیدشده توسط سیستم فتولتائیک و سیستم ذخیره‌ساز انرژی در هر ساختمان هوشمند مربوط به خود ساختمان هوشمند است و از این رو، هزینه‌ای در برنامه‌ریزی روزانه ساختمان هوشمند ندارد. پس داریم:

$$Cost_{Bought} = \sum_{t=1}^T [E_{app}(t) + E_{ESS}^{charge-grid}(t) - E_{PV}^{app}(t) - E_{ESS}^{dis-app}(t)] * Price_{Bought}(t) \quad (2)$$

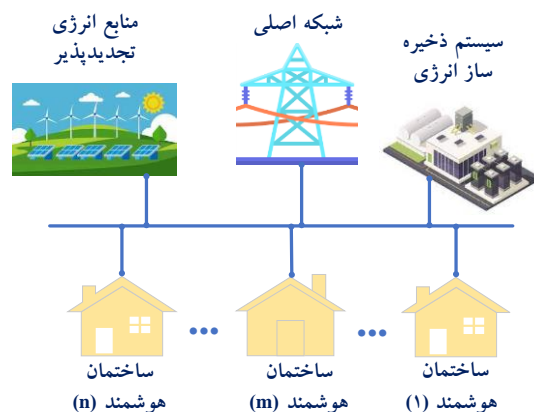
$$Cost_{Sale} = \sum_{t=1}^T E_{ESS}^{dis-grid}(t) * Price_{Sale}(t) \quad (3)$$

که در آن،  $E_{app}(t)$  انرژی مورد نیاز برای بارهای ثابت و بارهایی با قابلیت تغییر در زمان استفاده است.

مه و الگوریتم بهینه‌سازی وال در قسمت چهارم بیان شده‌اند. در قسمت پنجم، داده‌های سیستم شبیه‌سازی به همراه نتایج شبیه‌سازی شرح و تحلیل شده است. در نهایت، نتیجه‌گیری در قسمت ششم بیان شده است.

### ۲- سیستم مورد مطالعه

همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، سیستم مورد مطالعه یک ریزشبهه با تعداد  $n$  ساختمان هوشمند است. هر ساختمان هوشمند دارای بارهای ثابت<sup>۲۷</sup> و قابل تغییر<sup>۲۸</sup>، پنل‌های فتولتائیک و سیستم ذخیره‌ساز انرژی است. سیستم ذخیره‌ساز انرژی با ذخیره انرژی و دشارژ در بازه‌های زمانی که در آن‌ها قیمت انرژی زیاد است و همچنین، فروش به شبکه بالادست سبب کاهش هزینه کل هر ساختمان هوشمند می‌شود. سیستم ذخیره‌ساز انرژی در زمان شارژ به عنوان بار قابل تغییر و در زمان دشارژ به عنوان یک منبع تولید توان در نظر می‌شود. میزان انرژی هر ساختمان هوشمند برابر مجموع بارهای ثابت و قابل تغییر است. همچنین، انرژی مازاد مورد نیاز هر ساختمان هوشمند توسط شبکه بالادست تأمین می‌شود. شبکه بالادست میزان خرید و فروش انرژی هر ساختمان هوشمند را جمع‌آوری می‌کند و سپس برنامه‌ریزی را بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده انجام می‌دهد.



شکل (۱): سیستم ریزشبهه پیشنهادی با ساختمان‌های هوشمند

### ۳- مدل ریاضی و مسئله

در این بخش، در ابتدا، فرمول‌بندی مسئله با دو هدف

### ۲-۳- بارهای ثابت

بارهای ثابت مانند دوربین‌های امنیتی، یخچال، پمپ آب و ... به بارهایی گفته می‌شود که پروفایل مصرف انرژی ثابتی دارند و نمی‌توان زمان مصرف آن‌ها را تغییر داد؛ از این رو، انرژی مصرفی بارهای ثابت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{app}^{fixed}(t) = \sum_{l=1}^m PR_{app-fixed}^l(t) * \beta_{app-fixed}^l(t) \quad (8)$$

که در آن،  $m$  تعداد بارهای ثابت در هر ساختمان هوشمند را نشان می‌دهد.  $PR_{app-fixed}^l$  میزان توان مصرفی هر بار ثابت برای یک ساعت را نشان می‌دهد.  $\beta_{app-fixed}^l(t)$  نشان‌دهنده وضعیت روشن یا خاموش بودن هر بار ثابت است که یک عدد باینری است. زمانی که بار روشن باشد، برابر یک است و زمانی که بار خاموش باشد، برابر با صفر است.

### ۳-۳- بارهای قابل تغییر پیوسته یا بی‌وقفه

بارهای قابل تغییر پیوسته یا بدون وقفه از جمله ماشین لباسشویی و خشک‌کن، بارهایی هستند که می‌توان زمان روشن و خاموش بودن آن‌ها را مدیریت کرد و پس از روشن شدن، زمان استفاده آن پشت سر هم است. انرژی مصرفی بارهای قابل تغییر پیوسته به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{app}^{uninterrupted}(t) = \sum_{k=1}^n PR_{app-unint}^k(t) * \beta_{app-unint}^k(t) \quad (9)$$

که در آن،  $n$  تعداد بارهای قابل تغییر بی‌وقفه را نشان می‌دهد.  $PR_{app-shift}^k(t)$  میزان توان مصرفی هر بار قابل تغییر بی‌وقفه برای یک ساعت را نشان می‌دهد.  $\beta_{app-shift}^k(t)$  نشان‌دهنده وضعیت روشن یا خاموش بودن هر بار قابل تغییر بی‌وقفه است که یک عدد باینری است. زمانی که بار روشن باشد، برابر یک است و زمانی که بار خاموش باشد، برابر صفر است. زمان روشن یا خاموش بودن این بارها در مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌شود.

$E_{ESS}^{charge-grid}(t)$  مقدار انرژی خریداری شده از شبکه بالادست برای شارژ باتری را نشان می‌دهد.  $E_{PV}^{app}(t)$  مقدار انرژی تأمین شده بار توسط فتولتاییک است.  $E_{ESS}^{dis-app}$  مقدار انرژی تأمین شده بار توسط سیستم ذخیره‌ساز انرژی در زمان دشارژ است.  $Price_{Bought}(t)$  نشان‌دهنده قیمت خرید انرژی از شبکه بالادست است.  $E_{ESS}^{dis-grid}(t)$  مقدار انرژی فروخته شده به شبکه بالادست توسط سیستم ذخیره‌ساز انرژی در زمان دشارژ است.  $Price_{Sale}(t)$  قیمت فروش انرژی به شبکه بالادست است.  $T$  بازه زمانی را نشان می‌دهد که در این مقاله، بازه ۲۴ ساعته در نظر گرفته شده است.

دومین هدف مسئله پیشنهادی (نرخ پیک بار به میانگین) به صورت زیر ارائه شده است:

$$CF_2 = \min PAR = \frac{\max(E_{Bought}(t))}{Avg(E_{Bought}(t))} \quad (4)$$

که در آن،  $E_{Bought}(t)$  انرژی خریداری شده از شبکه بالادست است و به صورت زیر به دست می‌آید:

$$E_{Bought}(t) = E_{app}(t) + E_{ESS}^{charge-grid}(t) - E_{PV}^{app}(t) - E_{ESS}^{dis-app}(t) \quad (5)$$

بیشترین انرژی خریداری شده ( $\max(E_{Bought}(t))$ ) نیز برابر بیشترین مقدار انرژی خریداری شده در بازه زمانی ۲۴ ساعته است (در این مقاله، دوره زمانی یک ساعته در نظر گرفته شده است) و میانگین انرژی خریداری شده ( $Avg(E_{Bought}(t))$ ) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Avg(E_{Bought}(t)) = \frac{\sum_{t=1}^T E_{Bought}(t)}{T} \quad (6)$$

یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را می‌توان با روش‌های مختلف از جمله ضرایب وزنی، سطح پرتو و غیره حل کرد [۱۴، ۲۲-۲۴]. در این مقاله، مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با رویکرد جمع وزنی و ترکیب خطی دو تابع به یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه تبدیل شده است [۲۴]. پس داریم:

$$\min \omega_1 CF_1 + \omega_2 CF_2 \quad (7)$$

که در آن،  $\omega_1$  و  $\omega_2$  ضرایب وزنی هستند.

$$SOC_{ESS}^{min} \leq SOC_{ESS}(t) \leq SOC_{ESS}^{max} \quad (16)$$

$$SOC_{ESS}(t) = SOC_{ESS}(t-1) + \frac{E_{ESS}^{Charge}}{E_{ESS}} - \frac{E_{ESS}^{discharge}}{E_{ESS}} \quad (17)$$

سیستم ذخیره‌ساز انرژی را نشان می‌دهند.  $E_{ESS}^{Charge}$  و  $R_{ESS}^{Charge}$  و  $R_{ESS}^{discharge}$  به ترتیب نرخ شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی به ترتیب مقدار شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی را بیان می‌کنند. معادله (۱۳) نشان می‌دهد سیستم ذخیره‌ساز توسط شبکه بالادست ( $E_{ESS}^{charge-grid}$ ) و فتولتائیک ( $E_{ESS}^{charge-PV}$ ) شارژ می‌شود. با توجه به معادله (۱۵)، مقدار دشارژ برابر مقدار انرژی فروخته شده به شبکه بالادست ( $E_{ESS}^{dis-grid}(t)$ ) و تأمین بار از طریق سیستم ذخیره‌ساز انرژی ( $E_{ESS}^{dis-app}(t)$ ) است. همچنین،  $S_{ESS}$  نشان دهنده حالت شارژ و دشارژ و یک عدد باینری صفر یا یک است. معادله (۱۶) کمینه و بیشینه سطح انرژی را مشخص می‌کند.

### ۶-۳- قیود و مدل فتولتائیک

توان تولیدشده توسط پنل فتولتائیک در یک روز با بازه زمانی یک‌ساعته به صورت زیر است [۲۶]:

$$E_{PV}(t) = GHI(\tau) \cdot S \cdot \eta^{PV} \quad (18)$$

که در آن،  $GHI$  تابش افقی کل ( $kW/m^2$ ) در محل پنل‌های خورشیدی است.  $\tau$  زمان واقعی در بازه زمانی یک‌ساعته است.  $S$  مساحت کل ( $m^2$ ) پنل خورشیدی و  $\eta^{PV}$  راندمان تبدیل انرژی خورشیدی در سیستم فتولتائیک است.

انرژی تولیدشده در پنل فتولتائیک هر ساختمان هوشمند برای تأمین بار ساختمان هوشمند یا شارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی استفاده می‌شود؛ از این رو، داریم:

$$E_{PV}(t) = E_{PV}^{app}(t) + E_{ESS}^{charge-PV}(t) \quad (19)$$

در این مقاله، فروش انرژی به شبکه بالادست از طریق سیستم ذخیره‌ساز انرژی انجام می‌شود. از آنجا که سیستم ذخیره‌ساز انرژی قادر به ذخیره انرژی محدودی در یک بازه زمانی است، اگر پنل فتولتائیک انرژی بیشتری از مجموع

### ۴-۳- بارهای قابل تغییر باوقفه

بارهای قابل تغییر باوقفه از جمله اسپلینت و آبگرمکن، بارهایی هستند که می‌توان زمان روشن و خاموش بودن آن‌ها را مدیریت کرد و نیازی نیست که زمان استفاده آن‌ها پشت سر هم باشد و می‌توانند چندین بار خاموش و روشن شوند. انرژی مصرفی بارهای قابل تغییر باوقفه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{app}^{Interrupted}(t) = \sum_{i=1}^q PR_{app-Int}^i(t) * \beta_{app-Int}^i(t) \quad (10)$$

که در آن،  $q$  تعداد بارهای قابل تغییر باوقفه را نشان می‌دهد.  $PR_{app-Int}^i(t)$  میزان توان مصرفی هر بار قابل تغییر باوقفه برای یک ساعت را نشان می‌دهد.  $\beta_{app-Int}^i(t)$  وضعیت روشن یا خاموش بودن هر بار قابل تغییر باوقفه را نشان می‌دهد که یک عدد باینری است. زمانی که بار روشن باشد، برابر یک است و زمانی که بار خاموش باشد، برابر صفر است. زمان روشن یا خاموش بودن این بارها در مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌شود. کل بار مصرفی در هر ساختمان هوشمند به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$E_{app}(t) = E_{app}^{fixed}(t) + E_{app}^{uninterrupted}(t) + E_{app}^{Interrupted}(t) \quad (11)$$

### ۵-۳- قیود و مدل باتری

محدودیت‌های پارامترهای سیستم ذخیره‌ساز انرژی مانند نرخ شارژ ( $R_{ESS}^{Charge}$ )، نرخ دشارژ ( $R_{ESS}^{discharge}$ )، وضعیت سطح شارژ ( $SOC_{ESS}(t)$ )، حداقل سطح شارژ ( $SOC_{ESS}^{min}$ ) و حداکثر سطح دشارژ ( $SOC_{ESS}^{max}$ )، محدودیت‌های توان شارژ ( $E_{ESS}^{Charge}$ ) و دشارژ ( $E_{ESS}^{discharge}$ ) به صورت زیر مدل می‌شوند [۲۵]:

$$0 \leq E_{ESS}^{Charge} \leq R_{ESS}^{Charge} \cdot S_{ESS} \quad (12)$$

$$E_{ESS}^{Charge}(t) = E_{ESS}^{charge-grid}(t) + E_{ESS}^{charge-PV}(t) \quad (13)$$

$$0 \leq E_{ESS}^{discharge} \leq R_{ESS}^{discharge} (1 - S_{ESS}) \quad (14)$$

$$E_{ESS}^{discharge}(t) = E_{ESS}^{dis-app}(t) + E_{ESS}^{dis-grid}(t) \quad (15)$$

دوره به محله‌های مجازی خود ارسال می‌کند؛ بنابراین، واحدها با عدم شناسایی دریافت‌کننده و فرستنده اصلی به داده‌ها دست می‌یابند؛ بنابراین، ساختار ارائه‌شده باید دارای شرایط زیر باشد: (۱) مانیتورینگ بلادرنگ سیستم با هدف به دست آوردن شرایط پیش‌بینی بار، انرژی تولیدشده واحدها و انرژی مورد نیاز واحدهای هوشمند و غیره، (۲) مناسب برای طیف گسترده ریزش‌بکه، (۳) امکان مبادله داده‌های بلادرنگ با عدم همبستگی مستقیم بین واحدها و (۴) تعیین توپولوژی ریزش‌بکه و همگرایی به یک راه‌حل بهینه در عوامل هوشمند ریزش‌بکه؛ بنابراین، چارچوب رویکرد محاسبات ابر - مه با چندین لایه به شرح زیر ارائه می‌شود:

#### ۱-۱-۴- لایه لبه

بخش‌های فیزیکی ساختمان‌های هوشمند مانند تجهیزات اندازه‌گیری، سیستم ذخیره‌ساز انرژی، سیستم فتولتاییک و ... در لایه لبه هستند. این داده‌ها به محله‌های مجازی ارسال می‌شوند و با دریافت اطلاعات از لایه مه عمل می‌کنند.

#### ۲-۱-۴- لایه مه

لایه مه شامل تجهیزات شبکه با قابلیت محاسبات محلی و اندازه‌گیری داده‌های توزیع‌شده است و همچنین، سرورهای محلی این اطلاعات را دریافت می‌کنند. وظیفه اصلی این لایه گسترش محاسبات ابری در نزدیکی و کنار تجهیزات است که در پی آن، داده‌ها و اطلاعات بلادرنگ تجزیه و تحلیل می‌شوند و همچنین، داده‌ها را به صورت کوتاه‌مدت ثبت و ذخیره می‌کند. اطلاعات هر ساختمان هوشمند در لایه مه جمع‌آوری می‌شود و سپس مدیریت انرژی هر ساختمان هوشمند در لایه مه مربوط محاسبه می‌شود و در ادامه اطلاعات نهایی به لایه ابر برای پردازش ریزش‌بکه ارسال می‌شود. در محاسبات ابر - مه، به دلیل عدم نیاز به تجزیه داده‌ها در یک گره اصلی، زمان محاسبه ناچیز است و از آن صرف‌نظر می‌شود. در واقع، لایه مه به عنوان یک لایه توزیع‌شده در محاسبات ابر - مه عمل می‌کند که توانایی انجام محاسبات و ارسال اطلاعات را در روش توزیع‌شده دارد. یک سیستم با مفهوم ابر - مه در شکل (۲)

انرژی مورد نیاز بار ساختمان هوشمند و انرژی قابل ذخیره در سیستم ذخیره‌ساز انرژی تولید کند، باقی‌مانده انرژی پنل فتولتاییک تلف می‌شود. پس داریم:

$$E_{PV}(t) \geq E_{PV}^{app}(t) + E_{ESS}^{charge-PV}(t) \quad (20)$$

#### ۷-۳- قیود بار

در هر ساختمان هوشمند، تمامی بارها باید تأمین شوند و در این مقاله، سیستم ذخیره‌ساز انرژی و سیستم فتولتاییک بار را تأمین می‌کنند و کمبود انرژی بارها از شبکه بالادست تأمین می‌شود. پس داریم:

$$E_{app}(t) = E_{PV}^{app}(t) + E_{ESS}^{dis-app}(t) + E_{Bought}^{app}(t) \quad (21)$$

که در آن،  $E_{Bought}^{app}(t)$  مقدار انرژی خریداری‌شده از شبکه بالادست برای تأمین انرژی مورد نیاز بارهای ثابت و قابل تغییر است که مقدار این انرژی بزرگ‌تر یا مساوی صفر است ( $E_{Bought}^{app}(t) \geq 0$ )؛ از این رو، قید زیر را داریم:

$$0 \leq E_{PV}^{app}(t) + E_{ESS}^{dis-app}(t) \leq E_{app}(t) \quad (22)$$

#### ۴- مفاهیم

در این بخش، در ابتدا، مفاهیم مربوط به محاسبات لبه و محاسبات ابر - مه شرح داده می‌شود و سپس الگوریتم بهینه‌سازی وال ارائه می‌شود.

#### ۱-۴- محاسبات ابر - مه

در ریزش‌بکه‌های هوشمند، به دلیل نفوذ ساختمان‌های هوشمند و سایر تجهیزات هوشمند، نیاز به تبادل داده‌ها بین واحدها وجود دارد؛ از این رو، روش مجازی‌سازی همسایگی بر اساس رویکرد ابر - مه برای ایجاد این بستر ارائه شده است [۲۰، ۲۷]؛ در نتیجه، واحدها فقط قابلیت تبادل (دریافت و ارسال) اطلاعات خود را با محله‌های مجازی خود به جای واحد واقعی موجود در همسایه خود دارند. یک لایه مجازی توسط واحد مجازی‌سازی برای واحدها تعریف شده است که نشان‌دهنده سرویس در لایه مه است. این واحد داده‌های مورد نیاز را از کل واحدهای زیرمجموعه به دست می‌آورد و داده‌های هر واحد را در هر



فرآیند بهینه‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی وال شامل سه مرحله است که در ادامه ارائه شده‌اند: (الف) محاصره طعمه، (ب) حمله شبکه حباب‌دار و (پ) مرحله جست‌وجوی طعمه.

به‌روزرسانی موقعیت در مرحله محاصره طعمه به شرح زیر مدل می‌شود:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (23)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (24)$$

که در آن،  $\vec{X}(t)$  موقعیت وال‌ها در جمعیت لحظه فعلی است.  $\vec{X}^*(t)$  بهترین موقعیت بهینه‌ای است که جمعیت تا کنون به آن رسیده است.  $t$  تعداد تکرارهایی است که در حال حاضر اجرا شده‌اند.  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  بردارهای ضرایب قابل تنظیم هستند تا وال‌های جمعیت به تدریج به وال‌ها در موقعیت بهینه در زمان فعلی نزدیک شوند. بردارهای ضرایب  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (25)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r} \quad (26)$$

که در آن،  $\vec{r}$  یک عدد تصادفی بین صفر و یک است [۰، ۱]. همچنین،  $\vec{a}$  یک عدد بین صفر و دو [۰، ۲] است که به صورت خطی با افزایش تعداد تکرار کاهش می‌یابد.

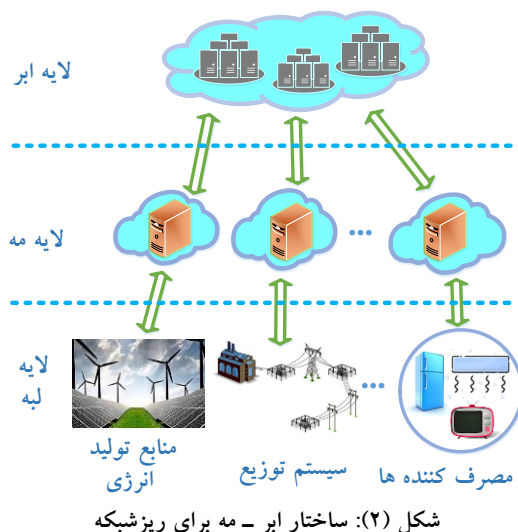
در مرحله حمله شبکه حبابی، روش‌های شکار وال‌های گوزپشت به دو نوع مکانیسم انقباض و مکانیسم تقریب مارپیچ تقسیم می‌شوند. در این مرحله، وال‌ها طعمه خود را در یک مسیر مارپیچی محاصره می‌کنند و به صورت مداوم حلقه محاصره اطراف را کوچک می‌کنند. هر وال در جمعیت ۵۰ درصد شانس دارد که موقعیت خود را از طریق مکانیسم انقباض یا مکانیسم تقریب مارپیچ به‌روز کند. به‌روزرسانی موقعیت مکانیسم انقباض به صورت معادله (۲۴) مدل می‌شود و به‌روزرسانی موقعیت مکانیسم تقریب مارپیچ به شرح زیر است:

$$\vec{D} = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (27)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (28)$$

که در آن،  $\vec{D}$  فاصله بین موقعیت فعلی وال‌ها در

نشان داده شده است. مفهوم ابر - مه از طبیعت گرفته شده است و از آنجا که ابر نسبت به مه از زمین دورتر است، لایه پایینی مه و لایه بالایی ابر نام‌گذاری شده است. در محاسبات ابر - مه، لایه مه یک زیرلایه از لایه ابر است که مسئول پردازش مجموعه داده‌های توزیع‌شده در ریزشبكة گسترده است.



شکل (۲): ساختار ابر - مه برای ریزشبكة

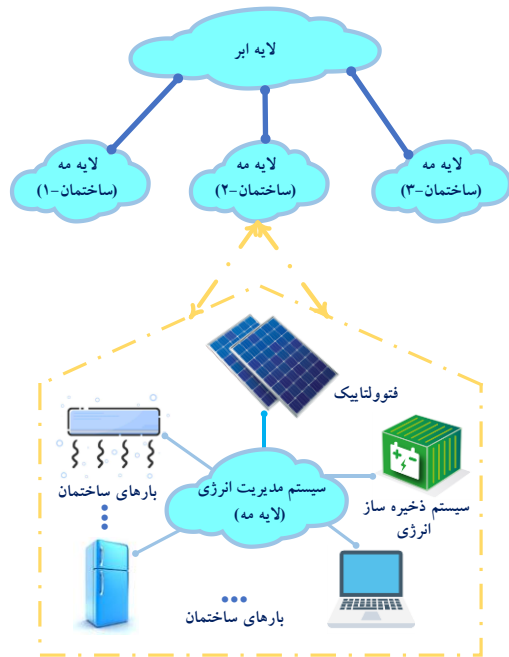
### ۳-۱-۴- لایه ابر

لایه ابر دارای توانایی محاسباتی زیاد است و همچنین، فضای ذخیره‌سازی زیادی برای ثبت و ذخیره‌سازی اطلاعات دارد. لایه مه خلاصه‌ای از داده‌ها را برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی بلندمدت به لایه ابر ارسال می‌کند و این مدت طولانی در لایه ابر ذخیره می‌شود. ارتباطات بین لایه‌های مه از طریق لایه ابر تنظیم می‌شود و همچنین، ارتباطات و سیاست‌های بین لایه‌های مه و سیستم را تنظیم می‌کند [۲۰].

### ۲-۴- الگوریتم بهینه‌سازی وال

الگوریتم بهینه‌سازی وال در سال ۲۰۱۶ توسط آقای میرجلالی بر اساس رفتار اجتماعی وال‌های گوزپشت در راهبرد شکار شبکه حباب الهام گرفته شده است. این الگوریتم از نظر سرعت همگرایی، اجرا و دقت بهینه‌سازی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مشابه بهتر عمل کرده است [۲۸].

دو سناریوی اصلی ارائه شده است: (الف) بدون در نظر گرفتن محاسبات ابر - مه و بهینه‌سازی هم‌زمان سه ساختمان هوشمند با یکدیگر و (ب) انجام محاسبات ابر - مه و در نظر گرفتن هر ساختمان هوشمند به عنوان یک لایه مه و بهینه‌سازی بر اساس ساختار ابر - مه.



شکل (۳): سیستم مورد مطالعه با سه ساختمان هوشمند

مشخات بارهای ساختمان هوشمند در جدول (۱) ارائه شده است [۸-۱۱] که شامل بارهای ثابت، بارهای قابل تغییر بی‌وقفه و باوقفه هستند. جدول (۲) مشخصات سیستم ذخیره‌ساز انرژی را نشان می‌دهد. مقدار توان تولیدی سیستم فتوولتاییک و قیمت خرید انرژی در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. همچنین، پارامترهای  $\omega_1$  و  $\omega_2$  به ترتیب برابر یک و ۵۰ در نظر گرفته شده‌اند.

جدول (۱): مشخصات بارهای هر ساختمان هوشمند

بارهای ثابت			
نوع بار	توان (kW)	مدت زمان استفاده روزانه (ساعت)	زمان شروع
یخچال	۰/۹	۲۱	۳
دوربین امنیتی	۰/۱	۲۴	۱
روشنایی	۰/۱	۷	۱۸
رایانه شخصی	۰/۲	۱۴	۹
تلویزیون	۰/۲	۶	۱۷

جمعیت و موقعیت مطلوب جمعیت تا کنون است.  $b$  ضریبی ثابت است که وضعیت ماریپیچ لگاریتمی را بیان می‌کند و  $l$  یک عدد تصادفی بین  $[0, 1]$  است.

به‌روزرسانی موقعیت در مرحله جست‌وجوی طعمه به شرح زیر مدل می‌شود:

$$\vec{D}^i = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand}(t) - \vec{X}(t)| \quad (29)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (30)$$

که در آن،  $\vec{X}_{rand}$  موقعیت والی است که به صورت تصادفی از جمعیت لحظه فعلی انتخاب شده است و به‌عنوان هدف برای نزدیک شدن دیگر وال‌ها در نظر گرفته می‌شود.

بنابراین، الگوریتم بهینه‌سازی وال به‌روزرسانی موقعیت وال‌ها در جمعیت را با توجه به مقدار عدد تصادفی  $p$  و بردار ضریب  $|\vec{A}|$  انتخاب می‌کند که به شرح زیر ارائه می‌شود:

$$\vec{W}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}, & \text{if } p < 0.5, \text{ and } |\vec{A}| \leq 1 \\ \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D}, & \text{if } p < 0.5, \text{ and } |\vec{A}| > 1 \\ \vec{D}^i \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t), & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (31)$$

که در آن،  $p$  یک عدد تصادفی بین  $[0, 1]$  است.

## ۵- سیستم مورد مطالعه و نتایج شبیه‌سازی

سیستم مورد مطالعه که در شکل (۳) نشان داده شده است، یک ریزشبه شامل سه خانه هوشمند است که انرژی هر خانه توسط سیستم فتوولتاییک، سیستم ذخیره‌ساز انرژی خود و همچنین، شبکه بالادست تأمین می‌شود و قابلیت فروش انرژی به شبکه بالادست را دارد. در این مقاله از نرم‌افزار متلب 2019a برای شبیه‌سازی و حل مسئله پیشنهادی استفاده شده است. همچنین، سیستم کامپیوتری که شبیه‌سازی بر روی آن انجام شده است، دارای پردازنده مرکزی با مشخصات (Intel Core(TM) i7-4600U CPU 2.70 GHz) است و همچنین، دارای ۱۲ گیگابایت رم از نوع DDR3 و ویندوز ۱۰ پرو ۶۴ بیتی است.

در این مقاله، برای نشان دادن کارایی محاسبات ابر - مه در کاهش حجم محاسبات و زمان محاسبات، سیستم تحت

سیستم ذخیره‌ساز انرژی در جدول (۲) و انرژی تولیدی سیستم فتوولتائیک مطابق شکل (۴)، (ب) اندازه مختلف شارژ و دشارژ باتری، (پ) قیمت‌های فروش انرژی مختلف. برای نشان دادن سه مورد مطالعاتی، در ساختمان هوشمند (۱) حالت پایه در نظر گرفته شده است. در ساختمان هوشمند (۲)، ظرفیت باتری به ۵ کیلو وات افزایش می‌یابد و همچنین، نرخ شارژ و دشارژ نیز ۰/۹ (کیلووات بر ساعت) در نظر گرفته شده است. در دو حالت قبل، قیمت خرید و فروش با یکدیگر برابر در نظر گرفته شده است. در ساختمان هوشمند (۳)، قیمت فروش انرژی به شبکه بالادست ۰/۹ قیمت خرید انرژی در نظر گرفته شده است.

دو سناریوی اصلی که حل مسئله بدون ساختار ابر - مه و با ساختار ابر - مه هستند، در ادامه بررسی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی برای تمامی سناریوهای بیان‌شده در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هر دو تابع هزینه از جمله هزینه کل و نرخ پیک به میانگین به طور هم‌زمان برای تمامی سناریوها کاهش یافته‌اند. با مقایسه نتایج سه ساختمان هوشمند با یکدیگر، مشاهده می‌شود سیستم مدیریت انرژی تحت مقادیر مختلف اندازه، شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی و قیمت‌های مختلف، مسئله بهینه‌سازی ارائه‌شده را حل کرده است.

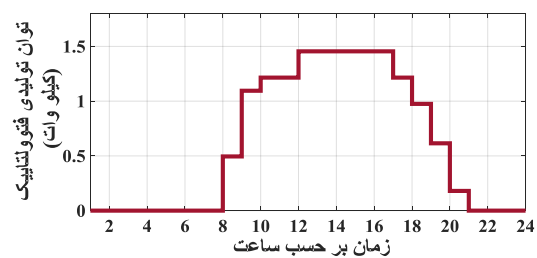
مقایسه نتایج ساختمان‌های هوشمند (۱) و (۲) نشان می‌دهد با افزایش حجم و نرخ شارژ و دشارژ، سیستم ذخیره‌ساز انرژی نقش بیشتری در تأمین بارها و فروش انرژی ایفا می‌کند و در پی آن، هزینه‌ها در ساختمان هوشمند (۲) نسبت به ساختمان هوشمند (۱) کاهش یافته‌اند. مقایسه نتایج ساختمان هوشمند (۳) با ساختمان هوشمند (۱) نشان می‌دهد با کم شدن هزینه فروش انرژی نسبت به خرید انرژی، مقدار انرژی فروخته‌شده کاهش می‌یابد.

همچنین، با انجام محاسبات ابر - مه و حل مسئله بهینه‌سازی هر ساختمان هوشمند به صورت محلی، حجم محاسبات و زمان محاسبات نسبت به حالت پایه و بدون ساختار ابر - مه، از ۶۶/۴۶ ثانیه به ۸/۵۲ ثانیه کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد در ریزشبهه با تعدادی زیاد

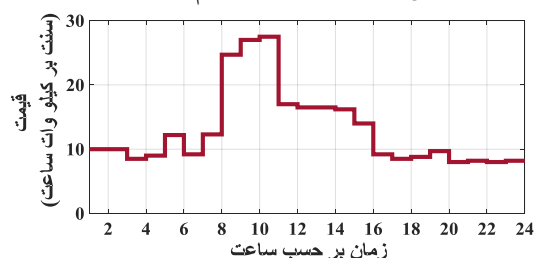
بارهای قابل تغییر بی‌وقفه			
نوع بار	توان (kW)	مدت زمان استفاده (روزانه (ساعت))	بازه زمانی برای استفاده
اجاق‌گاز	۰/۹	۳	۲۰-۹
ماشین لباس‌شویی	۱	۲	۲۲-۸
ماشین ظرف‌شویی	۱/۴	۲	۲۴-۱۷
خشک‌کن	۱/۸	۱	۲۲-۱۰
آبگرمکن	۱	۲	۲۴-۱۸
کتری برقی	۰/۵	۲	۱۹-۱۰
پلوپز	۰/۶	۲	۲۲-۱۴
اتو	۱/۱	۱	۱۸-۱۰
بارهای قابل تغییر باوقفه			
اسپلیت اصلی	۱/۳	۱۰	۲۴-۸
اسپلیت اتاق ۱	۱/۵	۸	۲۰-۹
اسپلیت اتاق ۲	۱/۳	۶	۱۰-۱
لب تاب	۰/۱	۴	۲۳-۸

جدول (۲): مشخصات سیستم ذخیره‌ساز انرژی

پارامتر	$R_{ESS}^{Charge}$ و $R_{ESS}^{discharge}$ (kW/h)	$SOC_{ESS}^{min}$ (kW)	$SOC_{ESS}^{max}$ (kW)	$SOC_{ESS}^{initial}$ (kW)
مقدار	۰/۶	۰/۵	۳	۰/۵



شکل (۴): توان تولیدی سیستم فتوولتائیک



شکل (۵): سیگنال قیمت ساعتی خرید انرژی

دو سناریوی اصلی تحت سه مورد مطالعاتی زیر برای حل مسئله بهینه‌سازی مدیریت انرژی (معادله (۷)) بررسی می‌شوند: (الف) حالت پایه با مشخصات بیان‌شده برای

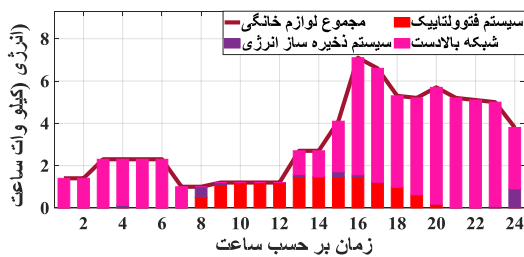
این رو، نیاز به انجام محاسبات ابر - مه در ریزشکته‌های هوشمند امری ضروری است. شکل (۶) زمان محاسباتی برای حل مسئله پیشنهادی با ساختار ابر - مه و بدون ساختار ابر - مه را نشان می‌دهد.

در ادامه، برای نمونه، جزئیات نتایج ساختمان هوشمند (۲) با ساختار ابر - مه برای بهترین پاسخ ارائه شده است. نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی وال برای حل مسئله مدیریت انرژی در شکل (۷) نشان داده شده است.

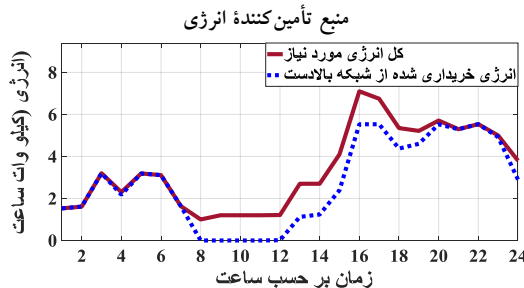
ساختمان هوشمند و منابع تولیدی و مصرفی هوشمند، حجم و زمان محاسبات به دلیل افزایش تعداد پارامترها و متغیرها به شدت افزایش می‌یابد. علاوه بر این، در ریزشکته با ساختار ابر - مه، به دلیل پایین‌تر بودن متغیرهای کنترلی در مسئله بهینه‌سازی، الگوریتم‌ها قادر به یافتن پاسخ‌های بهینه‌تر و مناسب‌تر هستند. در جدول (۳)، مشاهده می‌شود هزینه کل در حالت ابر - مه (۲۱۲۸/۳) نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن ساختار ابر - مه (۲۲۷۰/۷) کاهش یافته است؛ از

جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی

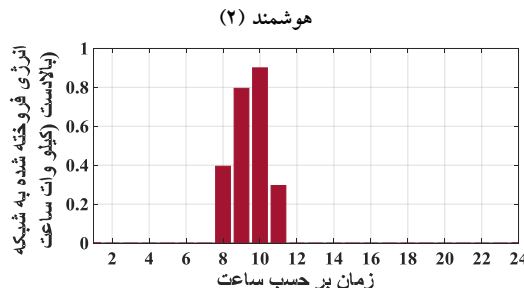
حالت اجرا		با انجام محاسبات ابر - مه				بدون انجام محاسبات ابر - مه			
		ساختمان هوشمند (۱)	ساختمان هوشمند (۲)	ساختمان هوشمند (۳)	مجموع سه ساختمان هوشمند	ساختمان هوشمند (۱)	ساختمان هوشمند (۲)	ساختمان هوشمند (۳)	مجموع سه ساختمان هوشمند
تابع هزینه کل	میانگین پاسخ‌ها	۷۱۰/۵۱	۷۰۱/۰۲	۷۱۶/۷۶	۲۱۲۸/۳	۷۶۵/۳۹	۷۴۵/۴۸	۷۵۹/۷۸	۲۲۷۰/۷
	بهترین جواب	۶۷۲/۲۷	۶۵۴/۲۳	۶۹۲/۶۳	۲۰۱۹/۱	۷۰۹/۹۳	۶۸۴/۵۸	۶۹۱/۳۱	۲۱۲۲/۳
	انحراف استاندارد	۱۶/۶۰	۱۶/۳۴	۱۴/۹۵	-	۱۸/۷۹۹	۲۰/۳۴	۲۱/۰۶	۴۱/۹۵
$(CF_1)$ هزینه کل (سنت)	میانگین پاسخ‌ها	۶۰۳/۱۲	۵۹۴/۹۲	۶۰۹/۴۶	۱۸۰۷/۵	۶۵۱/۲۶	۶۳۱/۶۵	۶۴۷/۰۱	۱۹۳۰/۱
	بهترین جواب	۵۶۷/۹۸	۵۵۴/۱۸	۵۸۵/۴۷	۱۷۰۷/۶	۵۹۴/۶۲	۵۶۴/۲۸	۵۷۸/۴۹	۱۷۵۴/۵
	انحراف استاندارد	۱۶/۲۷	۱۶/۰۷	۱۴/۴۵۲	-	۱۷/۸۸	۲۰/۲۶	۲۰/۲۹	۴۵/۵۰
$(CF_2)$ نرخ بیش به میانگین	میانگین پاسخ‌ها	۲/۱۵	۲/۱۲	۲/۱۵	۶/۴۲	۲/۲۸	۲/۲۸	۲/۲۶	۶/۸۱۱
	بهترین جواب	۲/۰۴	۱/۹۱	۱/۹۶	۵/۹۱	۲/۱۱	۲/۰۶	۲/۰۵	۶/۳۳
	انحراف استاندارد	۰/۰۶۰	۰/۰۵۹	۰/۰۶۲	-	۰/۱۶۹	۰/۱۵۸	۰/۱۵	۰/۲۷
کل انرژی مورد نیاز برای بهترین پاسخ (کیلووات)		۷۹/۹۳	۸۱/۰۸	۷۸/۸۸	۲۳۹/۸۹	۷۸/۷۱	۸۰/۲۶	۷۹/۲۳	۲۳۸/۲
کل انرژی خریداری شده برای بهترین پاسخ (کیلووات)		۶۴/۷۲	۶۴/۹۶	۶۳/۶۵	۱۹۳/۳۳	۶۳/۳۱	۶۴/۲۴	۶۴/۰۳	۱۹۱/۵۸
کل انرژی فروخته شده برای بهترین پاسخ (کیلووات)		۱/۴۲	۱/۷۰	۰/۶۱	۳/۳۳	۲/۲۹× <sup>۱۶-۱۰</sup>	۰/۹۴	۰/۷۳	۱/۶۷
زمان محاسبات (ثانیه)		۴۸/۲۸	۴۸/۱۱	۴۸/۵۲	-	۴۶۵/۴۶			



شکل (۹): انرژی مورد نیاز بارهای ساختمان هوشمند (۲) به همراه



شکل (۱۰): کل انرژی مورد نیاز و انرژی خریداری شده ساختمان



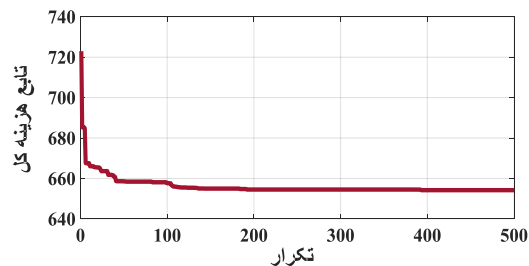
شکل (۱۱): انرژی فروخته شده به شبکه بالادست ساختمان هوشمند

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یک سیستم مدیریت انرژی دوهدفه برای کاهش هزینه و نرخ پیک به میانگین ارائه شده است. الگوریتم بهینه‌سازی وال برای حل مسئله مدیریت انرژی سه ساختمان هوشمند با سیستم ذخیره‌ساز انرژی، سیستم فتولتائیک و بارهای ثابت و قابل تغییر استفاده شده است. سناریوهای مختلف از جمله حجم و نرخ شارژ و دشارژ مختلف سیستم ذخیره‌ساز انرژی و قیمت فروش انرژی مختلف در ساختمان‌های هوشمند مختلف بررسی شده‌اند. علاوه بر این، ساختار محاسباتی ابر - مه با سه لایه ابر، مه و لبه با هدف مدیریت انرژی و بهینه‌سازی دو هدف هزینه و نرخ پیک به میانگین ساختمان‌های هوشمند در ریزشبهه‌ها ارائه شده است. با اجرای ساختار ابر - مه، حجم محاسبات و زمان محاسبات در مسئله مدیریت انرژی کاهش یافته

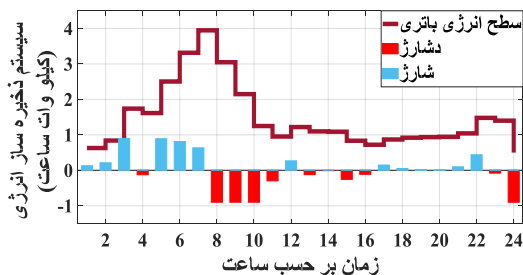


شکل (۶): زمان محاسبات مسئله مدیریت انرژی



شکل (۷): نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی وال برای حل مسئله پیشنهادی ساختمان هوشمند (۲)

مقدار انرژی ذخیره‌شده و همچنین، شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی در شکل (۸) نشان داده شده است. شکل (۹)، مقدار انرژی مورد نیاز بارهای ساختمان هوشمند (۲) و منبع تأمین‌کننده این انرژی را نشان می‌دهد. کل انرژی مورد نیاز ساختمان هوشمند و انرژی خریداری شده در شکل (۱۰) ارائه شده است. شکل (۱۱) مقدار انرژی فروخته شده به شبکه بالادست را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل می‌توان دید، انرژی مازاد سیستم ذخیره‌ساز انرژی پس از تأمین بار محلی در بازه‌های زمانی که در آن‌ها قیمت انرژی زیاد است، به شبکه بالادست فروخته می‌شود.



شکل (۸): سطح انرژی، شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی

ساختمان هوشمند (۲)

$Price_{Bought}(t)$	ذخیره‌ساز انرژی در زمان دشارژ قیمت خرید انرژی از شبکه بالادست
$E_{ESS}^{dis-grid}(t)$	مقدار انرژی فروخته‌شده به شبکه بالادست توسط سیستم ذخیره‌ساز انرژی در زمان دشارژ
$Price_{Sale}(t)$	قیمت فروش انرژی به شبکه بالادست
$E_{Bought}(t)$	انرژی خریداری‌شده از شبکه بالادست
$\max(E_{Bought}(t))$	بیشترین انرژی خریداری‌شده
$Avg(E_{Bought}(t))$	میانگین انرژی خریداری‌شده
$PR_{app-fixed}^l$	میزان توان مصرفی هر بار ثابت برای یک ساعت
$\beta_{app-fixed}^l(t)$	وضعیت روشن یا خاموش بودن هر بار ثابت
$PR_{app-shift}^k(t)$	میزان توان مصرفی هر بار قابل تغییر بی‌وقفه برای یک ساعت
$\beta_{app-shift}^k(t)$	وضعیت روشن یا خاموش بودن هر بار قابل تغییر بی‌وقفه
$PR_{app-Int}^i(t)$	میزان توان مصرفی هر بار قابل تغییر باوقفه برای یک ساعت
$\beta_{app-Int}^i(t)$	وضعیت روشن یا خاموش بودن هر بار قابل تغییر باوقفه
$R_{ESS}^{Charge}$	نرخ شارژ
$R_{ESS}^{discharge}$	نرخ دشارژ
$SOC_{ESS}(t)$	وضعیت سطح شارژ
$SOC_{ESS}^{min}$	حداقل سطح شارژ
$SOC_{ESS}^{max}$	حداکثر سطح شارژ
$E_{ESS}^{Charge}$	مقدار شارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی
$E_{ESS}^{discharge}$	مقدار دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی
$E_{ESS}^{charge-pv}$	شارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی توسط فتوولتائیک
$S_{ESS}$	حالت شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی
$E_{Bought}^{app}(t)$	مقدار انرژی خریداری‌شده از شبکه بالادست برای تأمین انرژی مورد نیاز بارهای ثابت و قابل تغییر
$\bar{X}(t)$	موقعیت وال‌ها در جمعیت لحظه فعلی
$\bar{X}^*(t)$	بهترین موقعیت بهینه‌ای است که جمعیت تا کنون به آن رسیده است
$\vec{C}$ و $\vec{A}$	بردارهای ضرایب
$\vec{r}$	عدد تصادفی بین صفر و یک
$\vec{a}$	یک عدد بین صفر و دو [۰, ۲]
$\vec{D}'$	فاصله بین موقعیت فعلی وال‌ها در جمعیت و موقعیت مطلوب جمعیت تا کنون
$l$	عدد تصادفی بین صفر و یک

است و همچنین، تابع هزینه به دلیل کاهش متغیرهای کنترلی نیز کاهش یافته است. برای ادامه این پژوهش، می‌توان در ساختمان‌های هوشمند، انرژی الکتریکی و حراراتی را به عنوان هاب انرژی با سیستم فتوولتائیک حراراتی بررسی کرد. همچنین، می‌توان انتشار آلودگی را به عنوان تابع هدف سوم در مسئله در نظر گرفت و سپس با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی بر پایه سطح پرتو، مسئله چندهدفه را حل کرد. علاوه بر این، می‌توان یک ریزشبکه با چندین ساختمان هوشمند، خودروهای برقی، ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی و انواع مختلف منابع انرژی توزیع‌شده را بر ساختار ابر - مه اجرا و سپس امنیت سایبری داده‌های مبادله‌شده را بررسی کرد. در نظر گرفتن و بررسی عدم قطعیت منابع تولیدی و بارها و همچنین استفاده از روش‌های یادگیری عمیق برای تخمین داده‌ها نیز می‌تواند در ادامه مطالعه شود.

#### فهرست علامت‌های اختصاری

$T$	بازه زمانی
$m$	تعداد بارهای ثابت در هر ساختمان هوشمند
$n$	تعداد بارهای قابل جابه‌جایی بی‌وقفه
$q$	تعداد بارهای قابل تغییر باوقفه
$GHI$	تابش افقی کل ( $kW/m^2$ ) در محل پنل‌های خورشیدی
$\tau$	زمان واقعی در بازه زمانی یک‌ساعته
$S$	مساحت کل ( $m^2$ ) پنل خورشیدی
$\eta^{pv}$	راندمان تبدیل انرژی خورشیدی در سیستم فتوولتائیک
$i$	تکرار فعلی
$b$	ضریب ثابت نشان‌دهنده وضعیت مارپیچ لگاریتمی
$Cost_{Bought}$	هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست
$Cost_{Sale}$	درآمد حاصل از فروش انرژی به شبکه بالادست
$E_{app}(t)$	انرژی مورد نیاز برای بارهای ثابت و قابل جابه‌جایی
$E_{ESS}^{charge-grid}(t)$	مقدار انرژی خریداری‌شده از شبکه بالادست برای شارژ باتری
$E_{pv}^{app}(t)$	مقدار انرژی تأمین‌شده بار توسط فتوولتائیک
$E_{ESS}^{dis-app}$	مقدار انرژی تأمین‌شده بار توسط سیستم

- Engineering (ACPEE), pp. 1970-1976, 14 April 2023.  
<https://doi.org/10.1109/ACPEE56931.2023.10135637>
- [8] Q. Lu, S. Lü, Y. Leng, Z. Zhang, "Optimal household energy management based on smart residential energy hub considering uncertain behaviors", *Energy*, Vol. 195, March 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117052>
- [9] A. Mohammad, M. Zuhair, I. Ashraf, "An optimal home energy management system with integration of renewable energy and energy storage with home to grid capability", *International Journal of Energy Research*, Vol. 46, No. 6, pp. 8352-66, May 2022.  
<https://doi.org/10.1002/er.7735>
- [10] S. S. Gharehveran, K. Shirini, S. C. Khavar, S. H. Mousavi, A. Abdolahi, "Deep learning-based demand response for short-term operation of renewable-based microgrids", *The Journal of Supercomputing*, Vol. 80, No. 18, pp. 26002-35, December 2024.  
<https://doi.org/10.1007/s11227-024-06407-z>
- [11] H. T. Dinh, J. Yun, D. M. Kim, K. H. Lee, D. Kim, "A home energy management system with renewable energy and energy storage utilizing main grid and electricity selling", *IEEE access*, Vol. 8, pp. 49436-50, March 2020.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979189>
- [12] S. Ayub, S. M. Ayob, C. W. Tan, S. M. Arif, M. Taimoor, L. Aziz, A. L. Bakar, Q. Al-Tashi, R. Ayop, "Multi-criteria energy management with preference induced load scheduling using grey wolf optimizer", *Sustainability*, Vol. 15, No. 2, January 2023.  
<https://doi.org/10.3390/su15020957>
- [13] J. Zupančič, B. Filipič, M. Gams, "Genetic-programming-based multi-objective optimization of strategies for home energy-management systems", *Energy*, Vol. 203, July 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117769>
- [14] M. Dehghani, S. M. Bornapour, "Smart Homes Energy Management: Optimal Multi-Objective Appliance Scheduling Model Considering Electrical Energy Storage and Renewable Energy Resources", *Heliyon*, January 2025.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42417>
- [15] M. Ahrari, K. Shirini, S. S. Gharehveran, M. G. Ahsae, S. Haidari, P. Anvari, "A security-constrained robust optimization for energy management of active distribution networks with presence of energy storage and demand flexibility", *Journal of Energy*
- موقعیت والی است که به صورت تصادفی از جمعیت لحظه فعلی انتخاب شده است  
عدد تصادفی بین صفر و یک
- $\vec{x}_{rand}$   

$p$

### مراجع

[1] M. J. Kabeyi, O. A. Olanrewaju, "Smart grid technologies and application in the sustainable energy transition: a review", *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 42, No. 1, pp. 685-758, December 2023.  
<https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2222298>

[2] J. Mello, J. Villar, "Integrating flexibility and energy local markets with wholesale balancing responsibilities in the context of renewable energy communities", *Energy*, Vol. 282, November 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128853>

[3] A. C. Duman, Ö. Gönül, H. S. Erden, Ö. Güler, "Survey-and simulation-based analysis of residential demand response: appliance use behavior, electricity tariffs, home energy management systems", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 96, September 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104628>

[4] A. Ajitha, S. Radhika, "A comprehensive review of demand response strategies and the role of emergent technologies for sustainable home energy management systems", *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 44, No. 1, pp. 2262-82, December 2023.  
<https://doi.org/10.1080/01430750.2023.2233522>

[5] T. H. Huy, H. T. Dinh, D. N. Vo, D. Kim, "Real-time energy scheduling for home energy management systems with an energy storage system and electric vehicle based on a supervised-learning-based strategy", *Energy Conversion and Management*, Vol. 292, September 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117340>

[6] M. A. Azizi, T. Niknam, M. Dehghani, H. Jokar, "Cloud-fog architecture-based control of smart island microgrid in master-slave organization using disturbance observer-based hybrid backstepping sliding mode controller", *Heliyon*, Vol. 10, No. 17, September 2024.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37453>

[7] Z. I. Nassirou, M. Ismahane, O. William, "Appliance scheduling optimization in a smart home energy management system with heuristic algorithms", In 2023 8th Asia Conference on Power and Electrical

- "Multi-objective aircraft landing problem: a multi-population solution based on non-dominated sorting genetic algorithm-II", *The Journal of Supercomputing*, Vol. 80, No. 17, pp. 25283-314, November 2024.  
<https://doi.org/10.1007/s11227-024-06385-2>
- [23] K. Shirini, H. S. Aghdasi, S. Saeevand, "Modified imperialist competitive algorithm for aircraft landing scheduling problem", *The Journal of Supercomputing*, Vol. 12, pp. 1-31, March 2024. doi: <https://doi.org/10.1007/s11227-024-05999-w>
- [24] H. T. Dinh, D. Kim, "An optimal energy-saving home energy management supporting user comfort and electricity selling with different prices", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 9235-49, January 2021. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3050757](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050757)
- [25] A. Baniasadi, D. Habibi, W. Al-Saedi, M. A. Masoum, C. K. Das, N. Mousavi, "Optimal sizing design and operation of electrical and thermal energy storage systems in smart buildings", *Journal of Energy Storage*, Vol. 28, April 2020. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101186>
- [26] M. S. Javadi, M. Gough, M. Lotfi, A. E. Nezhad, S. F. Santos, J. P. Catalão, "Optimal self-scheduling of home energy management system in the presence of photovoltaic power generation and batteries", *Energy*, Vol. 210, November 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118568>
- [27] F. Alsokhry, A. Annuk, M. A. Mohamed, M. Marinho, "An innovative cloud-fog-based smart grid scheme for efficient resource utilization", *Sensors*, Vol. 23, No. 4, February 2023. <https://doi.org/10.3390/s23041752>
- [28] S. Mirjalili, A. Lewis, "The whale optimization algorithm", *Advances in engineering software*, Vol. 95, pp. 51-67, May 2016. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
- Storage, Vol. 84, April 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111024>
- [16] S. S. Gharehveran, S. G. Zadeh, N. Rostami, "Resilience-oriented planning and pre-positioning of vehicle-mounted energy storage facilities in community microgrids", *Journal of Energy Storage*, Vol. 72, November 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108263>
- [17] S. S. Gharehveran, S. Ghassemzadeh, N. Rostami, "Two-stage resilience-constrained planning of coupled multi-energy microgrids in the presence of battery energy storages", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 83, August 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103952>
- [18] S. A. Hashmi, C. F. Ali, S. Zafar, "Internet of things and cloud computing-based energy management system for demand side management in smart grid", *International Journal of Energy Research*, Vol. 45, No. 1, pp. 1007-22, January 2021. <https://doi.org/10.1002/er.6141>
- [19] M. R. Akbari, H. Barati, A. Barati, "An efficient gray system theory-based routing protocol for energy consumption management in the Internet of Things using fog and cloud computing", *Computing*, Vol. 104, No. 6, pp. 1307-35, June 2022. <https://doi.org/10.1007/s00607-021-01048-z>
- [20] M. Dabbaghjamanesh, A. Kavousi-Fard, Z. Y. Dong, "A novel distributed cloud-fog based framework for energy management of networked microgrids", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 35, No. 4, pp. 2847-62, January 2020. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2957704>
- [21] J. Akram, A. Tahir, H. S. Munawar, A. Akram, A. Z. Kouzani, M. P. Mahmud, "Cloud-and fog-integrated smart grid model for efficient resource utilisation", *Sensors*, Vol. 21, No. 23, November 2021. <https://doi.org/10.3390/s21237846>
- [22] K. Shirini, H. S. Aghdasi, S. Saeevand,

<sup>1</sup> Microgrids<sup>2</sup> Internet-of-Things<sup>3</sup> Information and Communications Technology<sup>4</sup> Smart Grid<sup>5</sup> Demand Response Program<sup>6</sup> Smart Energy Management System<sup>7</sup> Smart Building<sup>8</sup> Renewable Energy Resources



- <sup>9</sup> Energy Storage System
- <sup>10</sup> Cloud Computing
- <sup>11</sup> Edge Computing
- <sup>12</sup> Fog Computing
- <sup>13</sup> Energy Hub
- <sup>14</sup> Smart Home
- <sup>15</sup> Deep Learning
- <sup>16</sup> Particle Swarm Optimization Algorithm
- <sup>17</sup> Grey Wolf Optimizer
- <sup>18</sup> Genetic Algorithm
- <sup>19</sup> Biogeography-based optimization algorithm
- <sup>20</sup> Household Appliance Scheduling
- <sup>21</sup> Peak-to-Average Ratio
- <sup>22</sup> Robust Optimizer
- <sup>23</sup> Energy Internet
- <sup>24</sup> Cloud-Fog Layers
- <sup>25</sup> Cloud-Fog Computing
- <sup>26</sup> Whale Optimization Algorithm
- <sup>27</sup> Shiftable Loads
- <sup>28</sup> Non-Shiftable Loads