The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems

Online ISSN: 2980-8693

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Hierarchical Model Predictive Control for Coordinating Storage and Building Load Flexibility to Support the Power Grid

Hosein Azarinfar[1*] | Mohsen Khosravi[2]

1. Assistance Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran. Email: hazarinfar@gmail.com
2. Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Gonabad, Noghab University Campus, Gonabad, Iran. Email: mohsen.khosravi@gonabad.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received: 27 June 2026
Revised: 28 July 2026
Accepted: 28 September 2026
Published Online: 01 January 2027

Keywords:
Energy management,
Local energy community,
Community energy storage,
Model predictive control,
Flexibility services.

ABSTRACT

Operational management of Local Energy Communities faces critical challenges including scalability, user privacy preservation, and real-time responsiveness. This paper proposes a novel First-stage hierarchical Model Predictive Control (MPC)-based energy management framework for LECs equipped with Community Energy Storage. In the first stage, the Community Energy Management System coordinates the optimized power profiles and utilizes the shared storage to maximize the community's self-sufficiency and self-consumption. The framework also enables real-time flexibility services, including building load flexibility and CES capacity sharing, to the grid. Flexibility is quantified using an envelope-based approach with quadratic optimization. Simulations on a three-building LEC (residential, office, healthcare) over weekly to yearly horizons demonstrate that the hierarchical approach achieves near-optimal performance while significantly reducing computation time and maintaining independence from the number of buildings. Yearly SS and SC reach 0.54 and 0.46, respectively. This work presents a practical, scalable, and privacy-preserving solution for sustainable LEC operation, integrating real-time ancillary service provision within an MPC-based operational framework suitable for real-world deployment.

Cite this article: Azarinfar, H. & Khosravi, M. (2027). Hierarchical Model Predictive Control for Coordinating Storage and Building Load Flexibility to Support the Power Grid. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 6 (1), 1-20.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.420000.1279

© Authors retain the copyright and full publishing rights.

Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.420000.1279

1. Introduction

Local Energy Communities offer direct benefits such as reduced energy bills and enhanced energy independence, as well as indirect advantages like increased environmental awareness and social cohesion. With technological advances and cost reductions in renewables and storage, numerous LECs are emerging across Europe. However, the operational management of LECs faces significant challenges, particularly concerning scalability, privacy, and real-time responsiveness. Centralized optimization approaches, while yielding globally optimal solutions, suffer from high computational burden and require extensive data sharing, raising privacy concerns. Decentralized or distributed methods offer alternatives but often lack coordination for community-level objectives. Furthermore, while various studies have explored energy trading, game theory, and blockchain for LEC management, most focus on offline or day-ahead planning. Real-time, online management especially incorporating Model Predictive Control and the provision of flexibility services to the grid remains underexplored. This paper fills these gaps by proposing a hierarchical MPC-based energy management framework that balances individual cost optimization with community-level sustainability, while

enabling real-time flexibility provision. The key contributions include: (i) a two-stage hierarchical MPC framework for LECs, (ii) a real-time flexibility quantification and provision mechanism.

2. Methodology

The proposed framework employs a two-stage hierarchical MPC-based energy management strategy for Local Energy Communities comprising diverse building types (residential, office, healthcare) equipped with photovoltaic generation and a Community Energy Storage (CES) system. The methodology operates through two distinct optimization stages executed sequentially at each time step.

For residential buildings, additional constraints account for time-shiftable appliances (dishwashers, washing machines). A ramping penalty term is incorporated to prevent abrupt HVAC switching. Each BEMS operates autonomously, preserving user privacy while generating optimal power consumption profiles. The Community Energy Management System receives the optimized profiles from all BEMSs and coordinates them through CES operation. The objective maximizes LEC sustainability measured by self-sufficiency (SS) and self-consumption (SC) indicators. CES dynamics include charging/discharging efficiencies and capacity constraints, with binary variables preventing simultaneous charge/discharge and power import/export. The optimization is subject to a critical constraint ensuring community operational costs do not exceed the sum of individual optimal costs from Stage 1.Real-time flexibility quantification employs an envelope-based approach, computing upward/downward flexibility bounds for each building's HVAC system through quadratic optimization problems while maintaining thermal comfort. Upon receiving grid aggregator requests, BEMSs execute tracking optimizations to adjust consumption profiles accordingly. The entire framework operates within a receding horizon MPC implementation, solving optimization problems repeatedly at each sampling interval, enabling real-time responsiveness to forecast updates and grid requests while maintaining computational scalability independent of community size.

3. Results

Simulation studies on a three-building LEC over weekly to yearly periods demonstrate the effectiveness of the proposed hierarchical approach. The three building archetypes (residential, office, healthcare) exhibited distinct thermal dynamics and HVAC consumption patterns consistent with their occupancy profiles. Residential buildings showed cyclic high-low consumption patterns reflecting occupancy schedules, office buildings demonstrated weekday activation with weekend shutdowns, and healthcare facilities maintained continuously active but cost-optimized operations. All buildings successfully maintained indoor temperatures within ASHRAE 55 comfort bounds throughout the simulation periods. Yearly sustainability metrics reached 0.54 for self-sufficiency and 0.46 for self-consumption, substantially contributing to LEC sustainability. The CES operated effectively by charging during high PV production periods and discharging during peak demand hours, minimizing grid exchange. The hierarchical approach demonstrated constant computation times independent of the number of buildings (tested with 5, 10, 15, and 50 buildings), contrasting sharply with the centralized approach whose computation time grew proportionally with building count. This scalability held for both LP cases (without binary variables) and MILP cases (including time-shiftable appliances). The parallel execution of BEMS optimizations in Stage 1 enables this independence, making the approach suitable for large-scale practical deployments. Flexibility quantification successfully captured each building's operational envelopes, representing technically feasible power consumption ranges under comfort constraints. All BEMSs successfully tracked randomly requested flexibility profiles during defined Flexibility Provision Periods (LFPPs) without significant deviations, demonstrating the framework's capability for real-time ancillary service provision including load flexibility and CES capacity sharing.

4. Conclusion

This paper has presented a novel two-stage hierarchical MPC-based energy management framework for Local Energy Communities integrating diverse building types with Community Energy Storage systems. The proposed approach successfully addresses critical challenges in LEC operation including scalability, privacy preservation, and real-time responsiveness while enabling sustainability enhancement and flexibility service provision to the grid aggregator. The hierarchical architecture

effectively balances individual building cost optimization (Stage 1) with community-level sustainability objectives measured by self-sufficiency and self-consumption metrics (Stage 2). This decoupling preserves user privacy by maintaining autonomous BEMS operation while enabling coordinated community benefits through CEMS supervision. A key innovation lies in the integration of flexibility services through an envelope-based quantification mechanism, allowing buildings to systematically determine their upward and downward flexibility bounds while respecting thermal comfort constraints. The framework successfully demonstrated load flexibility provision and CES capacity sharing services to the grid aggregator, contributing to improved grid stability and operational support. Computationally, the hierarchical approach exhibits remarkable scalability with computation times remaining constant regardless of community size, compared to the centralized counterpart whose computational burden grows linearly with building countThe yearly sustainability metrics of 0.54 self-sufficiency and 0.46 self-consumption confirm substantial environmental benefits. The framework's practical applicability is further validated through successful real-time tracking of flexibility requests across diverse building types, showcasing robustness in operational performance. Future work will address forecast uncertainties through stochastic programming approaches, investigate optimal sizing of energy devices for enhanced sustainability, and validate the framework through hardware-in-the-loop simulations for real-world deployment readiness. The proposed methodology represents a significant step toward practical, scalable, and privacy-preserving LEC implementation aligned with European Union energy community directives and sustainability goals.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

کنترل پیش‌بین سلسله‌مراتبی هماهنگی ذخیره‌ساز و انعطاف‌پذیری بار ساختمان به منظور پشتیبانی از شبکهٔ برق

حسین آذرین‌فر[۱*] | محسن خسروی[۲]

۱. نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران. رایانامه: hazarinfar@gmail.com

۲. عضو هیئت علمی دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران. رایانامه: mohsen.khosravi@gonabad.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۱۱

کلیدواژه:
مدیریت انرژی،
انجمن انرژی محلی،
ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی،
کنترل پیش‌بینی‌کنندهٔ مدل،
خدمات انعطاف‌پذیری.

چکیده

مدیریت عملیاتی انجمن‌های انرژی محلی با چالش‌های اساسی نظیر مقیاس‌پذیری، حفظ حریم خصوصی کاربران و پاسخ‌گویی بلادرنگ مواجه است. در این پژوهش، نوعی چارچوب مدیریت انرژی سلسله‌مراتبی دومرحله‌ای مبتنی بر کنترل پیش‌بینی‌کنندهٔ مدل (MPC) برای انجمن‌های انرژی محلی شامل ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی ارائه شده است. در مرحلهٔ نخست، هر ساختمان به صورت غیرمتمرکز و با هدف کمینه‌سازی توسط سیستم مدیریت انرژی ساختمان بهینه‌سازی می‌شود. در مرحلهٔ دوم، سیستم مدیریت انرژی جامعه با هماهنگی پروفایل‌های توان بهینه‌شده و بهره‌گیری از ذخیره‌ساز اشتراکی، خودکفایی و خودمصرفی کل جامعه را بیشینه می‌سازد. همچنین، چارچوب پیشنهادی قابلیت ارائهٔ خدمات انعطاف‌پذیری بلادرنگ شامل انعطاف‌پذیری بار ساختمان‌ها و اشتراک ظرفیت ذخیره‌ساز را به شبکهٔ برق فراهم می‌کند. کمّی‌سازی انعطاف‌پذیری با استفاده از روش پوشش عملیاتی و به‌کارگیری بهینه‌سازی درجهٔ ۲ انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها برای یک انجمن سه‌ساختمانه (مسکونی، اداری و درمانی) در بازه‌های هفتگی تا سالانه نشان می‌دهد زمان محاسبات را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد و مستقل از تعداد ساختمان‌ها باقی می‌ماند. شاخص‌های سالانهٔ خودکفایی و خودمصرفی به‌ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۴۶ محاسبه شده است. این کار یک راه‌حل عملی، مقیاس‌پذیر و با حفظ حریم خصوصی برای عملیات پایدار انجمن انرژی محلی ارائه می‌دهد که ارائهٔ خدمات جانبی بلادرنگ را در یک چارچوب عملیاتی مبتنی بر MPC که برای استقرار در دنیای واقعی مناسب است ادغام می‌کند.

استناد: آذرین‌فر، حسین و خسروی، محسن (۱۴۰۵). کنترل پیش‌بین سلسله‌مراتبی هماهنگی ذخیره‌ساز و انعطاف‌پذیری بار ساختمان به منظور پشتیبانی از شبکهٔ برق. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۶ (۱) ۱-۲۰.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.420000.1279

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.420000.1279

۱. مقدمه

اکثر مردم در سراسر جهان بیشتر وقت خود را در داخل ساختمان‌ها می‌گذرانند؛ بنابراین، باید بررسی کنیم که چگونه ساختمان‌ها می‌توانند در مصرف انرژی صرفه‌جویی کنند. به طور غیرمستقیم، عملکرد ساختمان‌ها حدود ۱/۲ درصد از مصرف انرژی جهانی امروز را تشکیل می‌دهد. علاوه بر این، ۵۰ درصد از انرژی مصرف‌شده در ساختمان‌ها برای گرمایش و سرمایش، ۱۰ درصد برای روشنایی و باقی برای سایر نیازهای انرژی است [۱]. ابتکار انجمن‌های انرژی به شهروندان اجازه می‌دهد تا به طور جمعی در مدیریت سیستم‌های انرژی مشارکت کنند و به عنوان محرکی برای طیف گسترده‌ای از مزایای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی عمل کنند. نمونه‌های زیادی همچون کاهش چشمگیر قبوض انرژی کاربران، ترویج دستورالعمل‌های سازگاری با محیط زیست و پایداری محلی در سطح جامعه و افراد، و قابلیت بهتر برای پشتیبانی از عملکرد شبکه برق نمونه‌هایی از ابتکار انجمن‌های انرژی هستند.

به طور خاص، دستورالعمل قوانین مشترک برای بازار داخلی برق (EU 2019/944) چارچوبی را برای انجمن‌های انرژی محلی ایجاد می‌کند که به انجمن‌ها و اعضای آن‌ها اجازه می‌دهد تا به طور قانونی در تولید، توزیع، تأمین، مصرف، ذخیره‌سازی، تجمیع و به‌اشتراک‌گذاری انرژی مشارکت کنند [۲]. مزایای مستقیم و قابل مشاهده عبارت‌اند از: افزایش سطح استقلال از شبکهٔ برق، ارتقای بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های انرژی برای شهروندان جامعه. مزیت غیرمستقیم، افزایش مشارکت شهروندان جامعه به منظور دستیابی به اهداف زیست‌محیطی و همکاری بیشتر در درون جامعه است [۳]. علاوه بر این، انجمن انرژی محلی[1] می‌تواند با ارائهٔ خدمات زیادی همچون جابه‌جایی بار و ذخیره‌سازی انرژی، از عملکرد شبکهٔ برق پشتیبانی کند [۴].

مطالعات مختلفی در ادبیات پژوهشی، راهبردهای گوناگونی را برای مدیریت انرژی در انجمن‌های انرژی محلی بررسی کرده‌اند. رایج‌ترین رویکردهای مدل‌سازی، رویکردهای متمرکز هستند که در آن‌ها مسائل بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ مهم‌ترین مسئله است [۵]. با این‌حال، مهم‌ترین مانع برای مدل‌سازی و پیاده‌سازی عملی، عدم انطباق با نگرانی‌های حریم خصوصی است، زیرا کاربران نهایی باید اطلاعات دقیقی را با نهاد مرکزی درگیر به اشتراک بگذارند [۶]. رویکردهای غیرمتمرکز و توزیع‌شده می‌توانند بر این کاستی‌ها غلبه کنند، به گونه‌ای که کاربران نهایی تصمیمات مستقل خود را می‌گیرند؛ این ممکن است شامل نوعی ارتباط دوجانبه یا همتا به همتا بین ساختمان‌ها باشد یا نباشد [۷]. علاوه بر این، در بسیاری از مطالعات، مدیریت انرژی انجمن انرژی محلی را از منظر معاملات انرژی مبتنی بر بازار، با رویکردهای مختلفی مانند، معاملات انرژی همتا به همتا [۸] بررسی کرده‌اند. یکی از جنبه‌های کلیدی برای تضمین موفقیت‌آمیز بودن عملیات انجمن انرژی محلی‌ها، اجرای موفقیت‌آمیز سیستم انرژی جامعهٔ یکپارچه[2] است [۹]. این فناوری‌ها شامل منابع انرژی تجدیدپذیر توزیع‌شده و ذخیره‌سازهای انرژی در سطح باتری‌های انفرادی و اشتراکی، تولید در سطح جامعه مانند واحدهای میکروتولید هم‌زمان گرما و برق، پنل‌های فتوولتائیک، پیل‌های سوختی و سیستم‌های گرمایش/سرمایش منطقه‌ای می‌شود. با تطبیق بهتر تولید و تقاضای بار در داخل انجمن انرژی محلی، خودمصرفی منابع انرژی تجدیدپذیر جامعه را تقویت می‌کند. شبکهٔ توزیع می‌تواند از ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی[3] به عنوان یک سرویس انعطاف‌پذیری برای بهبود پایداری شبکه استفاده کند [۱۰]. بنابراین، ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی می‌تواند نقشی مهم در تحقق گذار به سوی سیستم‌های انرژی کارآمد ایفا کند، همان‌طور که از تعداد زیاد پیاده‌سازی‌های عملی در پروژه‌های صنعتی واقعی دنیا مشهود است [۱۱]. محققان به طور جداگانه جنبه‌های مختلفی از یکپارچه‌سازی ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی را مطالعه کرده‌اند، پارامترهایی همچون اندازه‌گیری بهینه [۱۲]، کنترل [۱۳]، امکان‌سنجی فنی ـ اقتصادی [۱۴] و غیره. مدیریت ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی در محیط‌های مدل‌سازی، موضوعی است که به طرز شگفت‌آوری کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است و تنها تعداد محدودی از آثار به آن پرداخته‌اند [۱۳]. در محدودهٔ مدیریت عملیاتی، تعداد کمی از محققان نیز پتانسیل هدایت ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی توسط رویکردهای کنترل پیش‌بینی‌کنندهٔ مدل[4] را به عنوان راهکاری در برابر عدم‌قطعیت کوتاه‌مدت

1. Local Energy Community (LEC)
2. Integrated Community Energy Systems (ICES)
3. Community Energy Storage (CES)
4. Model Predictive Control

بررسی کرده‌اند [۱۵–۱۸]. بدون تردید، باید نسبت به مسائل نامطلوب شبکه که به تولید بالای توان فتوولتائیک که انجمن انرژی محلی مسئول آن است، مانند افزایش ولتاژ و ازدحام شبکه، هوشیار بود. حجم وسیعی از ادبیات، رویکردهایی را برای اپراتور سیستم توزیع (شبکه توزیع)[1] پیشنهاد می‌کنند تا با چنین مسائلی نه تنها در مرحلهٔ برنامه‌ریزی، بلکه در مرحلهٔ عملیاتی نیز مقابله کند [۱۹].

به طور خلاصه، وضعیت موجود به این صورت است: مطالعاتی که مدیریت انرژی ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی را در چارچوب شبیه‌سازی زمان‌واقعی مانند کنترل پیش‌بینی‌کنندهٔ مدل بررسی می‌کنند، نادر هستند. علاوه بر این، طبق یک مرور جامع [۲۰]، ارائهٔ برخط خدمات جانبی بالادستی به شبکهٔ برق توسط واحدهای ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی هنوز بررسی نشده است. کار حاضر با به‌کارگیری یک رویکرد مدیریت انرژی سلسله‌مراتبی (دو مرحله‌ای) ترکیب‌شده با کنترل پیش‌بینی‌کنندهٔ مدل برای یک انجمن محلی انرژی باذخیره‌ساز انرژی اشتراکی، به دو شکاف توصیف‌شده در بالا می‌پردازد. راهبرد پیشنهادی مبتنی بر مدیریت انرژی غیرمتمرکز با کمک یک هماهنگ‌کنندهٔ مرکزی است: به جای برقراری ارتباط با یکدیگر، کاربران نهایی با نهاد مرکزی تعامل دارند [۲۱].

۱–۱. هدف و ضرورت انجام پژوهش

انجمن‌انرژی محلی با امکان مشارکت جمعی شهروندان در تولید، مصرف، ذخیره‌سازی و مبادلهٔ انرژی، مزایای قابل توجهی از جمله کاهش قبوض انرژی، افزایش استقلال از شبکه و ارتقای آگاهی زیست‌محیطی را به همراه دارند. با این‌حال، مدیریت عملیاتی این انجمن‌ها در عمل با سه چالش بنیادین روبه‌رو است: (۱) مقیاس‌پذیری که افزایش تعداد ساختمان‌ها موجب رشد غیرخطی حجم مسئلهٔ بهینه‌سازی می‌شود؛ (۲) حریم خصوصی با رویکردهای متمرکز نیازمند اشتراک‌گذاری داده‌های دقیق مصرفی کاربران با نهاد مرکزی هستند که از منظر امنیتی و قانونی مطلوب نیست؛ و (۳) پاسخ‌گویی بلادرنگ که بسیاری از مطالعات موجود بر برنامه‌ریزی روز ـ پیش (Day-Ahead) متمرکز بوده و قابلیت واکنش به تولید خورشیدی و درخواست‌های شبکه را ندارند. از سوی دیگر، ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی (CES) به عنوان یکی از ارکان کلیدی انجمن‌های انرژی مدرن، می‌تواند نقش دوگانهٔ افزایش خودمصرفی تولیدات تجدیدپذیر محلی و ارائهٔ خدمات پشتیبانی به شبکهٔ توزیع را ایفا کند. با وجود کاربردهای گستردهٔ ذخیره‌ساز اشتراکی در پروژه‌های صنعتی، ادبیات پژوهشی در زمینهٔ هدایت زمان‌واقعی این ذخیره‌سازها با استفاده از کنترل پیش‌بینی‌کنندهٔ مدل و نیز بهره‌گیری از ظرفیت آن‌ها برای ارائهٔ خدمات جانبی به اپراتور سیستم توزیع، همچنان دچار کمبودهای اساسی است که این مطالعه به این منظر به آن پرداخته است.

۱–۲. گپ تحقیقاتی

بررسی نظام‌مند ادبیات فنی نشان می‌دهد شکاف‌های تحقیقاتی موجود در سه سطح قابل طبقه‌بندی است:

الف) رویکردهای بهینه‌سازی: رویکردهای متمرکز علی‌رغم دستیابی به جواب سراسری بهینه، با رشد تعداد ساختمان‌ها دچار افزایش شدید زمان محاسباتی شده و به دلیل نیاز به اشتراک‌گذاری گستردهٔ اطلاعات دقیق مصرفی، با نگرانی‌های جدی حریم خصوصی مواجه هستند. در مقابل، رویکردهای غیرمتمرکز یا توزیع‌شده اگرچه حریم خصوصی را تأمین می‌کنند، اما اغلب فاقد هماهنگی لازم برای تحقق اهداف کلان جامعه (نظیر بیشینه‌سازی خودکفایی و خودمصرفی) بوده و عملکرد آن‌ها در سطح جامعه بهینه نیست.

ب) افق زمانی و نوع کنترل: بخش قابل توجهی از پژوهش‌های موجود در زمینهٔ مدیریت انرژی‌ها، بر برنامه‌ریزی روز ـ پیش یا آفلاین متمرکز بوده‌اند. مطالعاتی که به مدیریت زمان واقعی یا برخط با استفاده از کنترل پیش‌بینی‌کنندهٔ مدل پرداخته‌اند، بسیار اندک هستند و به‌ویژه در زمینهٔ هدایت ذخیره ساز اشتراکی، شکاف مشخصی وجود دارد.

ج) ارائهٔ خدمات جانبی توسط ذخیره ساز اشتراکی :طبق مرور جامع ارائه‌شده در مطالعات مختلف، ارائهٔ برخط خدمات جانبی بالادستی به شبکهٔ برق توسط واحدهای ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی هنوز بررسی نشده است. به طور خاص، دو سرویس

1. Distribution System Operator (DSO)

کلیدی انعطاف‌پذیری بار (از طریق سیستم‌های HVAC ساختمان‌ها) و به‌اشتراک‌گذاری ظرفیت ذخیره‌ساز با هدف پشتیبانی از شبکهٔ توزیع و بهبود مسائلی نظیر افزایش ولتاژ و ازدحام شبکه، در چارچوب یک ساختار عملیاتی منسجم و مبتنی بر MPC، در پژوهش‌های پیشین مغفول مانده است.

۱-۳. نوآوری‌های پژوهش

نوآوری‌های این مقاله در سه محور اصلی قابل تلخیص است:

توسعهٔ یک روش کمّی‌سازی مبتنی بر پوشش عملیاتی که با حل دو مسئلهٔ بهینه‌سازی درجهٔ ۲، کرانه‌های بالایی (انعطاف‌پذیری صعودی) و پایینی (انعطاف‌پذیری نزولی) مصرف توان HVAC هر ساختمان را با رعایت قیود آسایش حرارتی استاندارد ASHRAE 55 مشخص می‌کند. این رویکرد، به خلاف توابع هدف خطی که موجب جهش بین نقاط افراطی می‌شوند، با استفاده از تابع درجهٔ ۲، پاسخ‌های هموار و قابل‌اطمینان‌تری تولید می‌کند. همچنین، فرایند ردیابی درخواست‌های شبکه (که در بازه‌های زمانی ازپیش‌تعیین‌شده با عنوان دورهٔ ارائهٔ انعطاف‌پذیری بار قفل می‌شوند) از طریق یک بهینه‌سازی ردیابی مجزا انجام می‌گیرد که امکان تنظیم لحظه‌ای مصرف را فراهم می‌آورد.

این پژوهش برای نخستین‌بار، ارائهٔ هم‌زمان دو نوع خدمات جانبی توسط ذخیره‌ساز اشتراکی یعنی (الف) انعطاف‌پذیری بار از طریق هماهنگی مصرف HVAC ساختمان‌ها و (ب) به‌اشتراک‌گذاری ظرفیت ذخیره‌ساز با شبکه را در قالب یک چارچوب عملیاتی مبتنی بر MPC پیاده‌سازی می‌کند.

شکل ۱ دیاگرام بررسی این مطالعه را نشان می‌دهد.

۲. روش کار

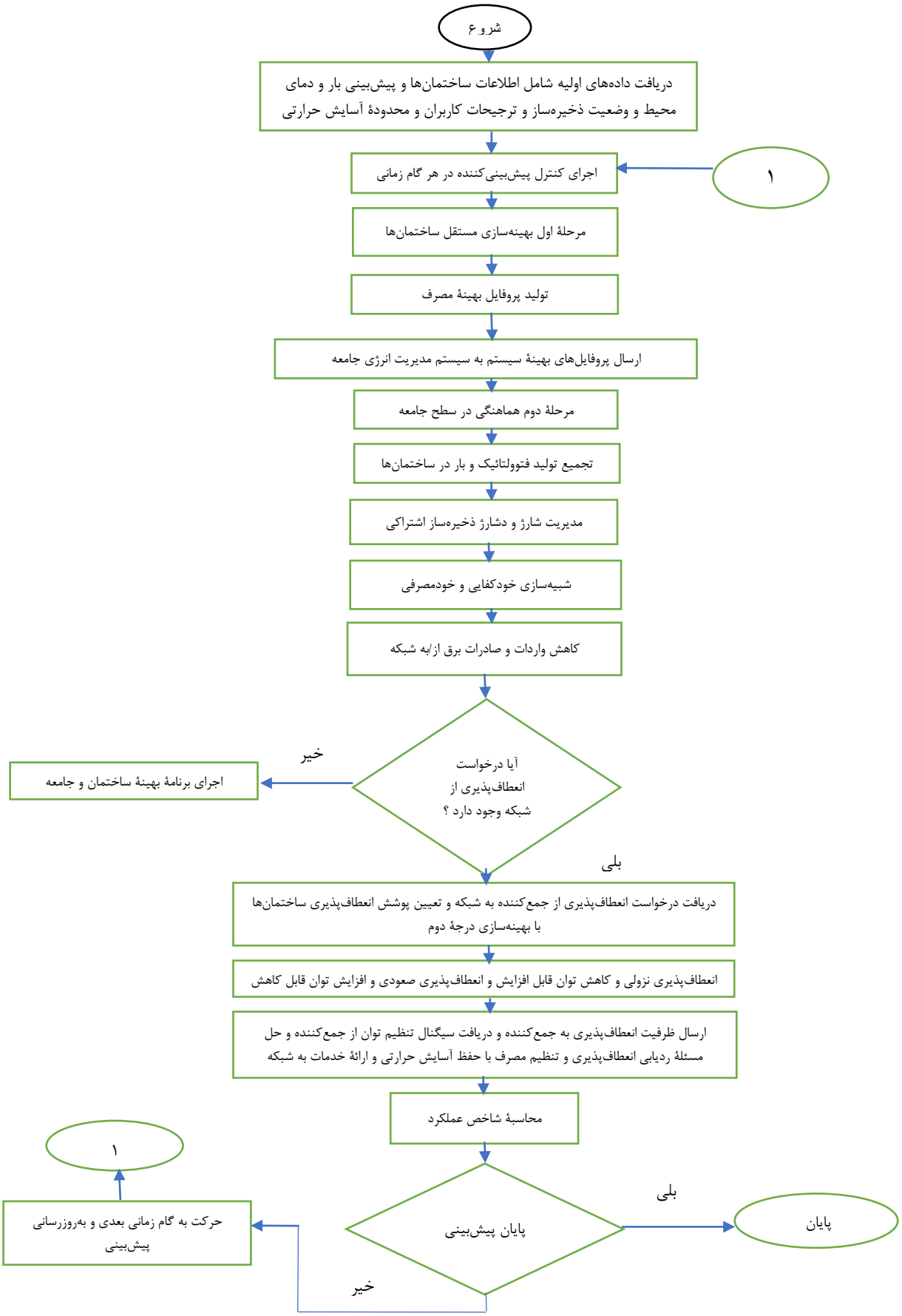
۲-۱. رویکرد مدیریت سلسله‌مراتبی

توصیف سیستم

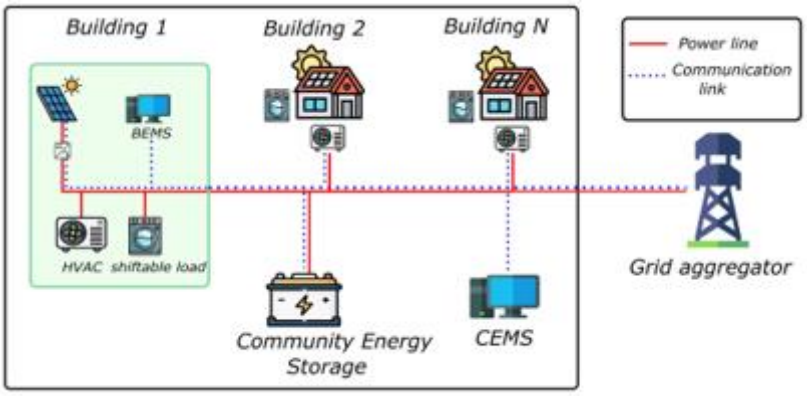
شکل ۲ نمودار شماتیک انجمن انرژی محلی فرضی و اجزای آن را نشان می‌دهد. مجموعه ساختمان‌های موجود در انجمن انرژی محلی را با N نشان می‌دهیم که در آن $N = |N|$ تعداد کل ساختمان‌ها است. ساختمان‌ها از طریق خطوط برق جریان متناوب[1] به یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی اشتراکی، و شبکهٔ برق اصلی متصل هستند.

فرض بر این است که انجمن انرژی محلی از سه گونهٔ ساختمانی کاملاً متفاوت تشکیل شده است: خانه‌های مسکونی، ادارات و مراکز درمانی. هر گونه ساختمانی مجهز به پنل‌های فتوولتائیک وابسته به اندازه (ظرفیت) برای تولید انرژی تجدیدپذیر در محل است تولید انرژی در محل، و یک سیستم گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع[2] متناسب با اندازه، برای تأمین نیاز گرمایش/ سرمایش خود، مجهز هستند. خانه‌های مسکونی همچنین، شامل لوازم برقی گسسته و قابل جابه‌جایی در زمان در مجموعه دستگاه‌های خود هستند، یعنی ماشین‌های ظرفشویی، ماشین‌های لباسشویی و خشک‌کن‌های لباس. فرض بر این است که تمام ساختمان‌های موجود در انجمن انرژی محلی کاملاً برقی‌شده هستند، یعنی تمام بار آن‌ها توسط برق تأمین می‌شود. آن‌ها همچنین سیستم‌های مدیریت انرژی ساختمان[3] اختصاصی خود را دارند که به طور بهینه عملکرد تمام دستگاه‌های قابل کنترل را هدایت می‌کنند. سیستم مدیریت انرژی جامعه [4]که در سطح بالاتری قرار دارد، به نوبهٔ خود مسئول مدیریت ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی، با در نظر گرفتن سیگنال‌های دریافتی از سیستم مدیریت انرژی ساختمان‌های فردی از طریق یک ارتباط دوطرفه است.

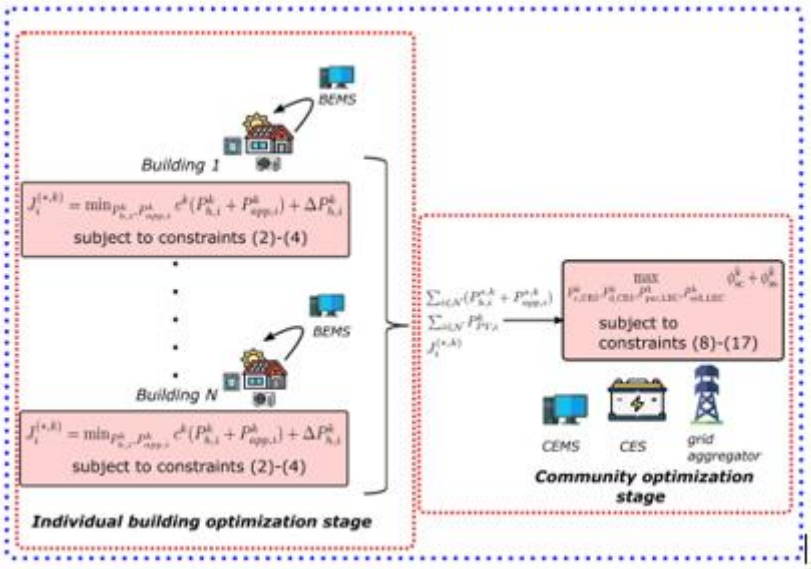
1. Alternating Current (AC)
2. Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC)
3. Building Energy Management System(BEMS)
4. Community Energy Management System(CEMS)



شکل ۱. فلوچارت مطالعهٔ مورد بررسی



شکل ۲. طرح‌بندی شماتیک انجمن‌های انرژی محلی



شکل ۳. نمایش شماتیک رویکرد دومرحله‌ای پیشنهادی

مدیریت انرژی در داخل انجمن انرژی محلی از رویکرد دومرحله‌ای پیشنهادی، همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، پیروی می‌کند:

- مرحلهٔ بهینه‌سازی تک‌ساختمان در این مرحله، تمام سیستم مدیریت انرژی ساختمان‌های فردی یا ساختمان‌های تکی، به طور موازی، مسئلهٔ کمینه‌سازی هزینهٔ محلی خود را (با توجه به ترجیحات فردی کاربران نهایی) حل می‌کنند و در نتیجه، پروفایل‌های مصرف توان بهینه‌شدهٔ مربوط به خود را تولید می‌کنند.
- مرحلهٔ بهینه‌سازی سیستم مدیریت انرژی جامعه پروفایل‌های مصرف توان بهینه‌شده را از هرسیستم مدیریت انرژی ساختمان دریافت می‌کند. از طریق هماهنگی بیشتر، این پروفایل‌ها به منظور خدمت به هدف سیستم مدیریت انرژی جامعه در جهت حداکثرسازی خودمصرفی و خودکفایی انجمن انرژی محلی، بیشتر اصلاح می‌شوند. بخش‌های بعدی، مراحل بهینه‌سازی را به‌تفصیل توضیح می‌دهند. فرض کنید H مجموعه گام‌های زمانی با $H = |H|$ به عنوان افق پیش‌بینی و Δk به عنوان زمان نمونه‌برداری باشد.

۲-۲. مرحلهٔ ۱: مرحلهٔ بهینه‌سازی تک‌ساختمان

فرض می‌کنیم که هر سیستم مدیریت انرژی ساختمان در انجمن انرژی محلی سیگنال‌های قیمت برق زمان واقعی را از بازار انرژی یا اپراتور سیستم دریافت می‌کند؛ این سیگنال‌ها، جدای از ترجیحات الزام‌آور کاربران نهایی، به عنوان نیروی محرکه پشت

تلاش‌های کمینه‌سازی هزینه هر ساختمان عمل می‌کنند. توجه داشته باشید که در این مرحله، هر ساختمان اساساً یک نهاد خودمختار است و برنامهٔ عملیاتی تعیین‌شده توسط سیستم مدیریت انرژی ساختمان، مستقل از ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی است. مسئلهٔ کمینه‌سازی هزینه برای هر ساختمان $i \in N$ را می‌توان به صورت انتزاعی به صورت رابطهٔ ۱ فرمول‌بندی کرد:

$$J_i^{(*,k)} = minC^k \left(P_{h,i}^k + P_{app,i}^k \right) + \Delta P_{h,i}^k \quad k \in H \tag{۱}$$

$$P_{h,i}^k \in P_{h,i} \tag{۲}$$

$$P_{h,min,i}^k \le P_{h,i}^k \le P_{h,max,i}^k \tag{۳}$$

$$P_{app,i}^k \in P_{app,i} \tag{۴}$$

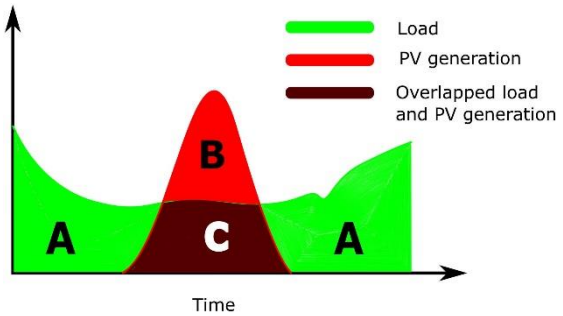
که در آن، بالانویس k مقدار پارامتر مربوطه را در گام زمانیk ام نشان می‌دهد و c قیمت برق است J_i هزینهٔ عملیاتی بهینه است. برای محدودیت‌های کلی (۲ و ۳)، P_h به توان مصرفی سیستم گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع اشاره دارد که $P_{h,min}^k$ و $P_{h,max}^k$ به‌ترتیب حداقل و حداکثر توان نامی هستند. محدودیت (۴) فقط برای ساختمان‌های مسکونی اعمال می‌شود، که در آن P_{app} توان مصرفی لوازم قابل جابه‌جایی در زمان است. مجموعه‌های P_h و P_{app} نمایش انتزاعی برای مدل‌های ریاضی مناسبی هستند که دینامیک ذاتی رفتار حرارتی ساختمان و عملکرد لوازم قابل جابه‌جایی را در بر می‌گیرند.

ΔP_h به عنوان یک جریمهٔ مصنوعی علیه فعال/غیرفعال شدن‌های ناگهانی سیستم گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع به تابع هدف اضافه می‌شود؛ این امر به دستیابی به عملکردی نرم‌تر و قابل اطمینان‌تر کمک می‌کند. بالانویس k مقدار متغیر/پارامتر مربوطه را در گام زمانیk ام نشان می‌دهد. مسئلهٔ بهینه‌سازی حاصل (۱)–(۴) یک برنامهٔ خطی با اعداد صحیح آمیخته است.

۲–۳. مرحلهٔ ۲: مرحلهٔ بهینه‌سازی جامعه

مسئلهٔ بهینه‌سازی سیستم مدیریت انرژی جامعه در مرحلهٔ ۲ بر اساس دو شاخص کلیدی عملکرد عملیات انجمن انرژی محلی بنا شده است که عملکرد آن را از نظر پایداری اندازه‌گیری می‌کنند (و سپس آن را هدایت می‌کنند). در اینجا هر دو را تعریف می‌کنیم.

۱) خودکفایی (Self-Sufficiency): خودکفایی هر نهاد تمام‌برقی، در اینجا انجمن انرژی محلی را می‌توان به عنوان سهم C از کل تقاضای بار A+C تعریف کرد که توسط تولید منابع انرژی تجدیدپذیر در داخل انجمن انرژی محلی تأمین می‌شود یعنی نسبت تقاضای باری که توسط شبکه تأمین نمی‌شود به کل بار.



شکل ٤. نمایش شماتیک بار روزانه و تولید فتوولتائیک (اقتباس و اصلاح‌شده از [۲۲])

$$SS = \frac{C}{A+C}$$

۲) خودمصرفی (Self-Consumption): خودمصرفی معیاری است که سهم C از برق تولیدشدهٔ محلی (B + C) (که در اینجا تولید فتوولتائیک است) را نشان می‌دهد برای تأمین تقاضای بار انجمن انرژی محلی به کار می‌رود، یعنی نسبت تولید PV استفاده‌شده به کل تولید فتوولتائیک.

$$SC = \frac{C}{B+C}$$

بر اساس تعاریف یادشده، خودکفایی و خودمصرفی انجمن انرژی محلی که به‌ترتیب با SS و SC نشان داده می‌شوند، را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\varnothing_{ss} = \sum_{i\epsilon N}\sum_{K\epsilon H}(P_{h,i}^{k} + P_{app,i}^{k}) - \sum_{K\epsilon H}P_{pur}^{k}\sum_{i\epsilon N}\sum_{k\epsilon H}(P_{h,i}^{k} + P_{app,i}^{k}) \quad (۵)$$

$$\varnothing_{SC} = \sum_{i\in N}\sum_{k\in H}P_{PV,i}^{k} - \sum_{k\in H}P_{sell}^{k}\sum_{i\in N}\sum_{k\in H}P_{PV,i}^{k} \quad (۶)$$

که در آن $P_{sell,LEC}$ توان صادراتی از انجمن انرژی محلی به شبکه است. بنابراین، صادرات کمتر برق ($P_{sell,LEC}$) به شبکه به خودمصرفی بالاتر انجمن انرژی محلی منجر خواهد شد. سیستم مدیریت انرژی جامعه اطلاعات ارسال‌شده از مرحلهٔ ۱ را جمع‌آوری می‌کند. تولید تجمیعی $\sum_{i\in\mathcal{N}}P_{PV,i}$ و پروفایل‌های مصرف توان بهینه‌شده $\sum_{i\in\mathcal{N}}(P_{h,i}^{*} + P_{app,i}^{*})$ را از تمام ساختمان‌ها به‌ترتیب به عنوان تولید و بار ثابت پردازش می‌کند و آن‌ها را از طریق ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی با هدف حداکثرسازی پایداری انجمن انرژی محلی هماهنگ می‌سازد. درخور یادآوری است که ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی می‌تواند برای کمک به سیستم مدیریت انرژی جامعه در بهینه‌سازی پایداری انجمن انرژی محلی، برق را از شبکه خریداری کند و به شبکه بفروشد به قیمت‌های برق توجهی ندارد و تنها هدف خود را حداکثرسازی پایداری انجمن انرژی محلی قرار می‌دهد.

مسئلهٔ بهینه‌سازی سیستم مدیریت انرژی جامعه، یعنی حداکثرسازی پایداری انجمن انرژی محلی، به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود (روابط ۷ تا ۱۶):

$$P_{c,CES}, P_{d,CES}^{k}, P_{pur,LEC}^{k}, P_{sell}^{K} \qquad \varnothing_{sc}^{k} + \varnothing_{ss}^{k} \quad k \in H \quad (۷)$$

$$E_{CES}^{k+1} = E_{CES}^{k} + \eta_{C}P_{C,CES}^{K}\Delta K - \frac{1}{\eta_{d}}P_{d,CES}^{k}\Delta k \quad (۸)$$

$$E_{min} \le E_{CES}^{k} \le E_{max} \quad (۹)$$

$$0 \le P_{c,CES}^{K} \le \zeta_{1,CES}P_{c,CES}^{max} \quad (۱۰)$$

$$0 \le P_{d,CES}^{k} \le \zeta_{2,CES}P_{d,CES}^{max} \quad (۱۱)$$

$$\zeta_{1,CES} + \zeta_{2,CES} \le 1 \qquad \zeta_{1,CES}, \zeta_{2,CES} \in \{0,1\} \quad (۱۲)$$

$$0 \le P_{Pur0,LEC}^{k} \le \theta_{1,LEC}P_{pur,LEC}^{max,k} \quad (۱۳)$$

$$0 \le P_{sell,LEC}^{k} \le \theta_{2,LEC}P_{sell,LEC}^{max,k} \quad (۱۴)$$

$$\theta_{1,LEC} + \theta_{2,LEC} \le 1 \qquad \theta_{1,LEC}, \theta_{2,LEC} \in \{0,1\} \quad (۱۵)$$

$$\sum_{K}C^{k}\left(P_{pur,LEC}^{k} - P_{sell,LEC}^{k}\right) \le \sum_{i}J_{i}^{*,k} \quad (۱۶)$$

که در آن معادلات ۸ و ۹ دینامیک توان ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی را با بازده شارژ و دشارژ $P_{c,CES}^{max}$ و $P_{d,CES}^{max}$ و انرژی ذخیره‌شده را نشان می‌دهند. محدودیت‌های ۱۰ تا ۱۲ توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی را ملزم به ماندن در زیر حداکثر توان شارژ مجاز و دشارژ مجاز می‌کنند. متغیرهای باینری $\zeta_{1,CES}$ از شارژ و دشارژ $\zeta_{2,CES}$ همزمان ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی جلوگیری می‌کنند. به طور مشابه، محدودیت‌های ۱۳ تا ۱۵ حداکثر توان خرید $P_{pur,LEC}^{max}$ و فروش ($P_{sell,LEC}^{max}$ از/به شبکه را محدود کرده و متغیرهای باینری $\theta_{1,LEC}$ و $\theta_{2,LEC}$ از فروش و خرید همزمان توان جلوگیری می‌کنند.

مسئلهٔ بهینه‌سازی سیستم مدیریت انرژی جامعه حاصل (۷)–(۱۶) یک برنامه‌ریزی خطی با اعداد صحیح آمیخته[1] است. این مسئله در هر گام زمانی با استفاده از استراتژی کنترل پیش‌بینی‌کننده مدل[2] به طور مکرر حل می‌شود. حداکثرسازی هر یک از معیارهای Φ_{sc} و Φ_{ss}، یا جمع آن‌ها، ساختمان‌ها را تشویق به مصرف برق تولیدشدهٔ محلی فتوولتائیک[3] در داخل انجمن انرژی

1. Mixed-Integer Linear Programming(MILP)
2. Model Predictive Control
3. Photovoltaic

محلی می‌کند و اساساً تبادل انرژی (واردات/صادرات) بین انجمن انرژی محلی و شبکهٔ اصلی را کاهش می‌دهد، در نتیجه پایداری جامعه را بهبود می‌بخشد.

۲-۴. ارائهٔ خدمات انعطاف‌پذیری توسط انجمن انرژی محلی

علاوه بر تمرکز بر پایداری خود، انجمن انرژی محلی نقش ارائه‌دهندهٔ خدمات انعطاف‌پذیری به شبکه را نیز ایفا می‌کند. به طور خاص، کار حاضر بر ارائهٔ انعطاف‌پذیری بار و خدمات به‌اشتراک‌گذاری ظرفیت ذخیره‌سازی متمرکز است. درخور یادآوری است که چارچوب سلسله‌مراتبی پیشنهادی می‌تواند در حالت عدم تمایل به انعطاف‌پذیری نیز عمل کند.

بخش‌های زیر این خدمات را به‌تفصیل شرح می‌دهند.

۲-۴-۱. انعطاف‌پذیری بار

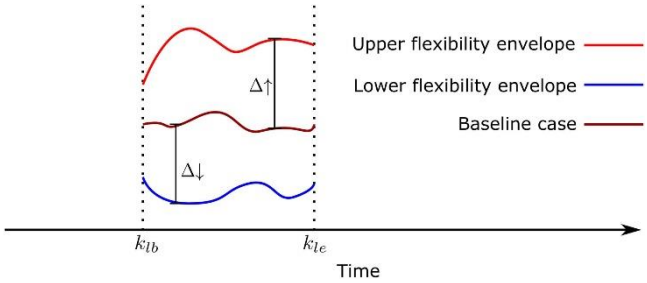
ساختمان‌ها با قابلیت کاهش، افزایش یا جابه‌جایی مصرف انرژی خود، پتانسیل قابل توجهی برای ارائهٔ انعطاف‌پذیری بار دارند. سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع علاوه بر سهم قابل توجهی از بار انرژی هر ساختمان، می‌توانند هم‌زمان به عنوان منابع اصلی انعطاف‌پذیری عمل کنند. در این کار، فرض می‌کنیم که تمام انعطاف‌پذیری بار موجود در ساختمان‌ها ناشی از سیستم‌هاگرمایش، تهویه و تهویه مطبوع است که می‌توانند در زمان‌واقعی به درخواست‌های انعطاف‌پذیری شبکه پاسخ دهند. در این کار، اصطلاح «درخواست انعطاف‌پذیری» یک پروفایل توان مشخص را تعریف می‌کند که توسط شبکه درخواست می‌شود و ساختمان مورد نظر باید تا حد امکان از آن پیروی کند. اگرچه شبکه ممکن است در تئوری درخواست ارائهٔ انعطاف‌پذیری را در هر بازه زمانی دلخواهی داشته باشد، این کار بر این اساس عمل می‌کند که تمام درخواست‌های انعطاف‌پذیری در یک مدت‌زمان ازپیش‌تعیین‌شده به نام دورهٔ ارائهٔ انعطاف‌پذیری بار که با بازه نشان داده می‌شود، «قفل» هستند؛ این امر زمان کافی را برای ساختمان فراهم می‌کند تا برنامهٔ عملیاتی خود را دوباره تنظیم کند. دورهٔ ارائهٔ انعطاف‌پذیری بار دارای وضوح زمانی مشابه با زمان نمونه‌برداری مسئلهٔ بهینه‌سازی در هر مرحله است. k_{lb} و k_{le} گام‌های زمانی مربوط به شروع و پایان دورهٔ ارائهٔ انعطاف‌پذیری بار هستند. ارائهٔ انعطاف‌پذیری به روش زیر عمل می‌کند:

در گام زمانی $k_{lb} - 2$، هر سیستم مدیریت انرژی ساختمان، به همراه پروفایل توان مورد انتظار ساختمان، میزان انعطاف‌پذیری باری را که ساختمان می‌تواند از طریق سیستم مدیریت انرژی جامعه به جمع‌کنندهٔ توان ارائه دهد، ارسال می‌کند.

- در گام زمانی $k_{lb} - 1$، جمع‌کنندهٔ شبکه الزامات انعطاف‌پذیری خود را به سیستم مدیریت انرژی جامعه ارسال می‌کند که متعاقباً به عنوان هدف مصرف توان جدید ساختمان‌ها طی دورهٔ ارائهٔ انعطاف‌پذیری بار به آن‌ها ابلاغ می‌شود.
- در گام زمانی بعدی، هر سیستم مدیریت انرژی ساختمان یک مسئلهٔ بهینه‌سازی درجهٔ دوم را برای دنبال کردن مصرف توان جدید در افق زمانی $[k_{lb}, k_{le}]$ حل می‌کند.

این امر به سیستم گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع اجازه می‌دهد تا انعطاف‌پذیری ذاتی داشته باشد که می‌توان از آن برای افزایش انعطاف‌پذیری رو به بالا یا کاهش انعطاف‌پذیری رو به پایین مصرف انرژی ساختمان، ضمن رعایت آسایش حرارتی، استفاده کرد [۲۳].

برای کمّی‌سازی مناسب انعطاف‌پذیری ناشی از سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع، مفهوم پوشش انعطاف‌پذیری [۲۴] را تطبیق می‌دهیم که انعطاف‌پذیری موجود را نسبت به یک حالت مبنا و یک کف و سقف انحراف دقیق اندازه‌گیری می‌کند (شکل ۵ را ببینید). پوشش‌های انعطاف‌پذیری محدوده امکان‌پذیر فنی را نشان می‌دهند که سطح مصرف توان ممکن است در آن قرار گیرد، مشروط به محدودیت‌های داخلی ساختمان که مد نظر سیستم ما است.



شکل ۵. تعیین کمی انعطاف‌پذیری با استفاده از رویکرد پوشش انعطاف‌پذیری

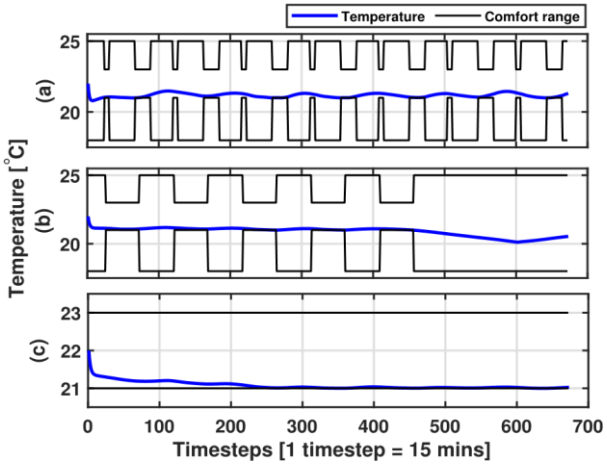
$$\min_{P^k_{\mathrm{h},i},P^k_{\mathrm{app},i}} (P^k_{\mathrm{h},i} - P_{\mathrm{h,max}})^2 \qquad k \in [k_{\mathrm{lb}},k_{\mathrm{le}}] \tag{۱۷}$$

با رعایت محدودیت‌های ۲ ـ ۴، که در آن $P_{h,max}$ بیشینهٔ ظرفیت توان مصرفی سیستم تهویهٔ مطبوع است. ما تابع هدف درجهٔ ۲ را برمی‌گزینیم تا از اثر نامطلوب تابع هدف خطی یعنی جهش افراطی بین نقاط جلوگیری کنیم. به طور مشابه، برای حد پایینی پوشش انعطاف‌پذیری ($\Delta\downarrow$)، مسئلهٔ بهینه‌سازی زیر حل می‌شود (رابطهٔ ۱۸).

$$\min_{P^k_{\mathrm{h},i},P^k_{\mathrm{app},i}} (P^k_{\mathrm{h},i} - 0)^2 \qquad k \in [k_{\mathrm{lb}},k_{\mathrm{le}}] \tag{۱۸}$$

۲) بازتعدیل مصرف توان: پس از دریافت مقدار انعطاف‌پذیری بار در دسترس، انباشتگر شبکه، درخواست‌های انعطاف‌پذیری را از طریق سیستم مدیریت انرژی مرکزی برای کاهش یا افزایش مصرف توان ساختمان‌ها ارسال می‌کند. مقدار انعطاف‌پذیری درخواستی از سوی شبکهٔ برق را با $\tilde{\Delta}$ نشان می‌دهیم که بسته به نیازهای شبکه، می‌تواند مثبت (انعطاف‌پذیری صعودی) یا منفی (انعطاف‌پذیری نزولی) باشد. در پاسخ، سیستم مدیریت انرژی ساختمان محلی برای ساختمان $i \in N$، مسئلهٔ بهینه‌سازی ردیابی زیر را اجرا می‌کند تا مصرف توان ساختمان را مطابق با درخواست انعطاف‌پذیری تنظیم کند.

$$\min_{P^k_{\mathrm{h},i},P^k_{\mathrm{app},i}} \left(P^k_{\mathrm{h},i} - P^{k,*}_{\mathrm{h},i} - \tilde{\Delta}_k\right)^2 \qquad k \in [k_{\mathrm{lb}},k_{\mathrm{le}}] \tag{۱۹}$$



شکل ٦. مرحلهٔ ۱: پویایی دمای هوای داخلی در (الف) ساختمان مسکونی، (ب) ساختمان اداری و (ج) ساختمان مرکز درمانی

۳. مطالعهٔ موردی

ابتدا، عملکرد رویکرد پیشنهادی روی یک انجمن انرژی محلی متشکل از ۳ ساختمان، نشان داده می‌شود. اگرچه از نظر اندازه متفاوت هستند، فرض بر این است که ساختمان‌ها دارای پارامترهای حرارتی یکسان (مقاومت حرارتی و ظرفیت حرارتی) هستند که با استفاده از جعبه‌ابزار R به نام CSTM-R، [۲۵] بر اساس اندازه‌گیری‌های واقعی از یک ساختمان مسکونی یک‌طبقه در

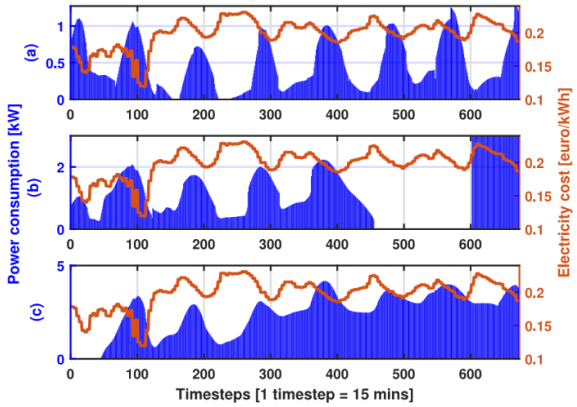
آرهوس، دانمارک [۲۶]، شناسایی شده‌اند. به سه ساختمان، برنامه‌های دمایی نقطه‌تنظیم متفاوتی مطابق با دستورالعمل‌های استاندارد ASHRAE 55 اختصاص داده شده است تا رفتار حرارتی هر گونه (مسکونی، اداری، مرکز درمانی) به‌درستی شبیه‌سازی شود [۲۷]. در رابطه با سیستم ذخیره‌سازی انرژی، واحدSAMSUNG SDI ESS ذخیره‌ساز لیتیوم ـ یونی ۳/۶ کیلووات‌ساعت [۲۸] به عنوان کوچک‌ترین واحد برای اهداف شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. اندازه‌های سه گونهٔ ساختمانی به نسبت ۱ : ۲ : ۳ حفظ شده‌اند؛ بنابراین، بدون از دست دادن کلیت، یک ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی با ظرفیت ۲۱/۶ کیلووات‌ساعت (۶ * ۳/۶) متناسب با اندازهٔ ساختمان‌ها در نظر گرفته شده است [۲۹]. داده‌های هواشناسی مانند (دمای محیط و تابش خورشیدی) برای مکان مشخص با استفاده از نرم‌افزار Meteonorm تولید شده‌اند. تمام مسائل بهینه‌سازی در نرم‌افزار متلب با استفاده از جعبه‌ابزار YALMIP فرمول‌بندی شده است [۳۰].

۳-۱. عملکرد نهادهای درگیر

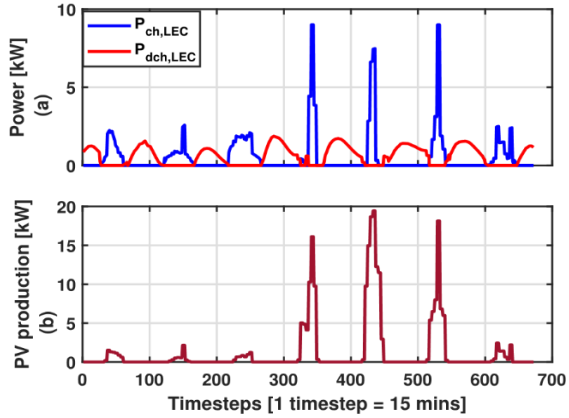
۱) رفتار گونه‌های ساختمانی: تحلیل خود را با بررسی انواع دینامیک حرارتی ساختمان‌های حاصل از مرحلهٔ ۱ آغاز می‌کنیم، جایی که سیستم‌های HVAC به عنوان تنها بار انعطاف‌پذیر برای ساختمان‌ها عمل می‌کنند. شکل ۵، تغییرات دمای هوای داخل ساختمان را طی یک هفته برای هر گونهٔ ساختمانی نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، هر سیستم مدیریت انرژی ساختمان به‌راحتی دما را در محدودهٔ آسایش قابل قبول حفظ می‌کند. در نتیجه اهداف بهینه‌سازی گوناگون در سطح فردی و جمعی، پروفایل حرارتی هر گونهٔ ساختمانی همواره در حد تعیین‌شده توسط کاربر خود قرار می‌گیرد. با این‌حال، برای کاربردهای زمان واقعی، همان‌طور که در [۳۱] مشاهده شده است، خطر مواجهه با انحرافات عمده از نظر آسایش حرارتی ناچیز است. به دلیل اندازهٔ کوچک‌تر ساختمان مسکونی، که به دینامیک حرارتی سریع‌تری منجر می‌شود، تغییرات دمایی آن پیک‌های جزئی را نشان می‌دهد که با این‌حال مشکل قابل توجهی ایجاد نمی‌کنند.

شکل ۷ مصرف توان هفتگی سیستم گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع را در هر ساختمان که از مرحلهٔ ۱ به دست آمده است، نشان می‌دهد. به منظور کاهش هزینه‌های ساختمان، سیستم گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع عملکرد شدید خود را برای دوره‌هایی که سطح قیمت برق پایین است، ذخیره می‌کند. همچنین، الگوی مصرفی طبیعی و پیوسته را نشان می‌دهد که نتیجهٔ مستقیم جریمهٔ نرخ تغییر در رابطهٔ ۱ است. همچنین، مشاهده می‌کنید که گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع اداری طی آخر هفته خاموش می‌شود و به سمت شروع اولین روز کاری دوباره راه‌اندازی می‌شود و گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع مرکز درمانی عملکردی بهینه از نظر هزینه، اما همواره فعال را حفظ می‌کند. پروفایل‌های مصرف توان محاسبه‌شده متعاقباً برای مرحلهٔ ۲ پیش رو به سیستم مدیریت انرژی جامعه ارسال می‌شوند.

۲) عملکرد انجمن انرژی محلی: شکل ۸ (a) دینامیک شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی را نشان می‌دهد. ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی به جای خرید توان از شبکه، ذخیره‌سازی انرژی را در دوره‌های تولید بالای فتوولتائیک در انجمن انرژی محلی انتخاب می‌کند؛ انرژی که برای بعداً تقاضای بالای گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع را در اواخر بعدازظهر/شب جبران کند. اگرذخیره‌ساز انرژی اشتراکی به طور تصادفی ظرفیت شارژ خود را به حداکثر برساند، هر تولید مازاد فتوولتائیک مستقیم تقاضای گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع را تأمین می‌کند و هر «باقی‌ماندهٔ مازاد» درنهایت به شبکه تزریق می‌شود. بر اساس طراحی، فقط تبادل حداقلی انرژی بین انجمن انرژی محلی و شبکه وجود دارد که به حداکثرسازی پایداری آن، همان‌طور که توسط معیارهای مربوط به خودکفایی و خودمصرفی بیان می‌شود، منجر می‌شود.

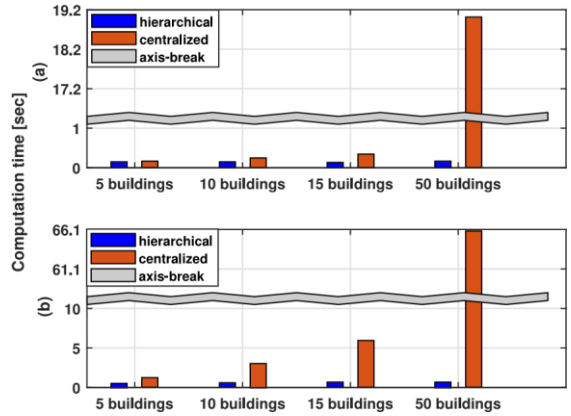


شکل ۷. مرحلهٔ ۱: مصرف انرژی سیستم تهویهٔ مطبوع طی یک هفته برای (الف) ساختمان مسکونی، (ب) ساختمان اداری و (ج) ساختمان مرکز درمانی



شکل ۸. (الف) مرحلهٔ ۲: دینامیک توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی، (ب) تولید توان فتوولتائیک

یک ویژگی جالب توجه این است که معیارهای خودکفایی و خودمصرفی در واقع متناقض هستند: به عنوان مثال، انجمن انرژی محلی طی تابستان، زمانی که تولید فتوولتائیک بیشتر تقاضای بار را یا به طور مستقیم یا غیرمستقیم از طریق ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی تأمین می‌کند، حداکثر خودکفایی را نشان می‌دهد. خودمصرفی در این دوره به دلیل مقدار قابل توجهی از توان مازاد فتوولتائیک که به طور پیش‌فرض به شبکه بازگردانده می‌شود، کاهش چشمگیری می‌یابد. میانگین سالانهٔ انجمن انرژی محلی از نظر خودکفایی و خودمصرفی به‌ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۴۶ است و در نتیجه، به طور قابل توجهی به پایداری انجمن انرژی محلی کمک می‌کند. خودکفایی و خودمصرفی انجمن انرژی محلی به‌وضوح به اندازه‌گیری دستگاه‌های انرژی وابسته هستند.



شکل ۹. زمان‌های محاسباتی رویکردهای سلسله‌مراتبی و متمرکز با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۵۰ ساختمان در انجمن انرژی محلی، (الف) بدون و (ب) با وجود لوازم خانگی قابل‌جابه‌جایی (انعطاف‌پذیر در زمان مصرف)

ج. رویکرد متمرکز در مقابل رویکرد سلسله‌مراتبی

برای ارزیابی عملکرد رویکرد سلسله‌مراتبی، لازم است که آن را با معیار استاندارد، یعنی یک رویکرد متمرکز فرضی که مرحلهٔ ۱ را حذف می‌کند و سیستم مدیریت انرژی جامعه را مسئول مدیریت متمرکز تک‌تک دستگاه‌های انرژی در انجمن انرژی محلی، در تمام ساختمان‌ها، می‌کند، مقایسه کنیم. ما سه حالت مختلف از اندازهٔ انجمن انرژی محلی، با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۵۰ ساختمان را بررسی می‌کنیم. بدون از دست دادن کلیت، تمام ساختمان‌های درنظرگرفته‌شده به عنوان واحدهای مسکونی در نظر گرفته می‌شوند، حالت a، بدون لوازم خانگی مسئله برنامه‌ریزی خطی[1] و حالت B با لوازم خانگی قابل جابه‌جایی در زمان مصرف، مسئلهٔ برنامه‌ریزی خطی با اعداد صحیح آمیخته زمان‌های محاسباتی برای حل هر دو حالت تحت راهبردهای متمرکز و سلسله‌مراتبی در شکل ۸ نشان داده شده است.

زمان محاسباتی تحت رویکرد متمرکز به طور متناسب با تعداد ساختمان‌های موجود در انجمن انرژی محلی افزایش می‌یابد، در حالی که رویکرد سلسله‌مراتبی مدام زمان‌های محاسباتی پایینی را نشان می‌دهد که ظاهراً کاملاً مستقل از تعداد ساختمان‌های شبیه‌سازی‌شده است. این نتیجه مستقیم اجرای موازی مسائل بهینه‌سازی سیستم مدیریت انرژی ساختمان‌های تکی در مرحلهٔ ۱ است. علی‌رغم اینکه زمان محاسباتی برای رویکرد متمرکز از نظر بزرگی در مقایسه با رویکرد سلسله‌مراتبی بیشتر است، همچنان برای پیاده‌سازی‌های عملی مربوط به تعداد کمی از ساختمان‌ها قابل قبول باشد اگرچه انتظار می‌رود که رویکرد متمرکز برای موارد با ده‌ها ساختمان از نظر قابلیت اطمینان کاهش یابد. با این‌حال، همان‌طور که پیش‌تر شد، رویکردهای متمرکز زمانی که مسائل مربوط به حریم خصوصی یا امنیت سایبری مطرح می‌شوند، به‌ویژه زمانی که تعداد کاربران نهایی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، انتخاب‌های ضعیفی هستند. علی‌رغم اینکه این مزایا را مستقیم کمّی نکرده‌ایم، رویکرد سلسله‌مراتبی بدون شک از نظر تبادل اطلاعات و وابستگی به یک نهاد مرکزی، مقاوم‌تر است.

مشاهدات مشابهی را می‌توان برای حالتی که شامل لوازم قابل جابه‌جایی (یعنی متغیرهای باینری) در مدل است، استخراج کرد. در حالی که زمان محاسباتی به طور قابل پیش‌بینی برای هر دو رویکرد افزایش می‌یابد، رویکرد سلسله‌مراتبی ویژگی مهم خود یعنی استقلال از تعداد ساختمان‌های موجود در انجمن انرژی محلی را حفظ می‌کند و در نتیجه، برتری خود را نسبت به رویکرد متمرکز از نظر مقیاس‌پذیری برای پیاده‌سازی در دنیای واقعی ثابت می‌کند، زیرا زمان محاسباتی با افزایش تعداد ساختمان‌ها ثابت می‌ماند.

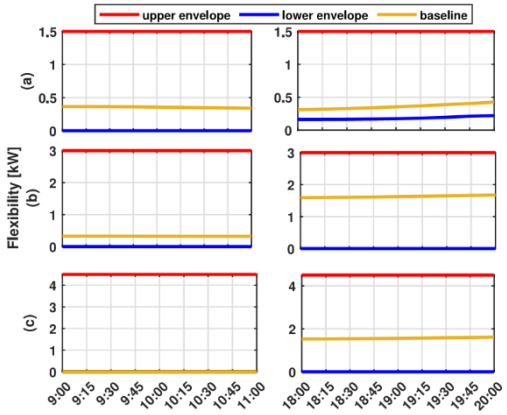
۳-۳. ارائهٔ انعطاف‌پذیری بار

برای بررسی ارائهٔ خدمات انعطاف‌پذیری، دو دورهٔ اوج تقاضای روزانه را به عنوان دورهٔ ارائهٔ انعطاف‌پذیری بار[2] در نظر می‌گیریم، یعنی ساعت‌های۰۹:۰۰–۱۱:۰۰ و ۱۸:۰۰–۲۰:۰۰. همان‌طور که در بخش قبلی توضیح داده شد، انجمن انرژی محلی انعطاف‌پذیری موجود را در ساعت ۰۸:۳۰ و ۱۷:۳۰ به جمع‌کنندهٔ شبکه ارسال می‌کند و جمع‌کننده نیز درخواست‌های انعطاف‌پذیری خود را به‌ترتیب در ساعت ۰۸:۴۵ و ۱۷:۴۵ بازمی‌گرداند. انجمن انرژی محلی برای یک دورهٔ یک‌روزه شبیه‌سازی می‌شود.

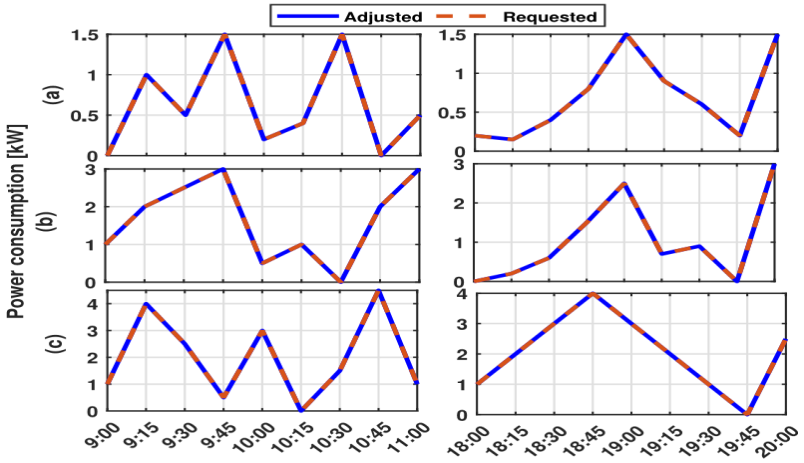
شکل ۱۰ نتایج کمّی‌سازی انعطاف‌پذیری ساختمان‌ها را نشان می‌دهد، یعنی پوشش‌های عملیاتی که بر اساس اهداف ۱۸ و ۱۹ و با رعایت محدودیت‌های ۲ تا ۴ به دست آمده‌اند. هر ساختمان ممکن است پیشنهاد دهد که مصرف توان گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع خود را تا حداکثر یا حداقل مقدار خود تغییر دهد، به‌جز ساختمان مسکونی در ساعت‌های عصر که باید سطح قابل قبولی برای دمای داخلی حفظ کند. توجه داشته باشید در صورتی که ساختمانی از قبل در حداقل یا حداکثر توان خود کار کند مانند مرکز درمانی در شکل ۱۰(c)، پروفایل مبنا با محدودهٔ فنی پوشش انعطاف‌پذیری همپوشانی دارد. هرسیستم مدیریت انرژی ساختمان پوشش انعطاف‌پذیری خود را به جمع‌کنندهٔ شبکه از طریق سیستم مدیریت انرژی جامعه ارسال می‌کند که متعاقباً پروفایل‌های مصرف توان جدید را به هر کاربر نهایی ارسال می‌کند.

1. Linear Programming (LP)
2. Load Flexibility Provision Period (LFPP)

برای بررسی عملکرد داخلی این فرایند، ابتدا پروفایل‌های توان تصادفی را در محدوده‌های انعطاف‌پذیری کمّی‌شده تعریف می‌کنیم. شکل ۱۱، توان مصرفی به طور تصادفی درخواست‌شده و سپس تنظیم‌شده هر ساختمان را طی دورهٔ ارائهٔ انعطاف‌پذیری بار نشان می‌دهد. بدیهی است که تمام سیستم مدیریت انرژی ساختمان ها با موفقیت پروفایل‌های توان درخواستی را بدون هیچ انحراف قابل توجهی دنبال می‌کنند.



شکل ۱۰. پوش‌های انعطاف‌پذیری بالا و پایین طی دورهٔ ارائهٔ انعطاف‌پذیری بار برای (الف) ساختمان مسکونی، (ب) ساختمان اداری و (ج) مرکز درمانی



شکل ۱۱. توان مصرفی تعدیل‌شده طی دورهٔ ارائهٔ انعطاف‌پذیری بار برای (الف) ساختمان مسکونی، (ب) ساختمان اداری و (ج) مرکز درمانی

۳-۴. قوت‌ها

از قوت‌های این مطالعه می‌توان به زمان محاسبات در رویکرد پیشنهادی مستقل از تعداد ساختمان‌ها اشاره کرد. این ویژگی، که از اجرای موازی بهینه‌سازی‌های BEMS در مرحلهٔ اول نشئت می‌گیرد، کاربرد عملی روش را برای جوامع با تعداد زیاد اعضا تضمین می‌کند. همچنین، استفاده از شاخص‌های خودکفایی (SS) و خودمصرفی (SC) به صورت هم‌زمان و تحلیل تناقض ذاتی آن‌ها در فصل‌های مختلف، درک واقع‌گرایانه‌ای از عملکرد جامعه ارائه می‌دهد.

۳-۵. ضعف‌ها

با وجود در نظر گرفتن سه گونهٔ ساختمانی متفاوت، پارامترهای مقاومت و ظرفیت حرارتی برای همهٔ ساختمان‌ها یکسان فرض شده است. در عمل، ساختمان‌های واقعی دارای عایق‌بندی، مصالح و نفوذپذیری متفاوتی هستند که بر دقت نتایج تأثیر می‌گذارد. مطالعه فقط بر سه گونه (مسکونی، اداری، درمانی) متمرکز شده و تنوع بیشتری مانند ساختمان‌های تجاری، آموزشی یا صنعتی بررسی نشده است. همچنین، امکان وجود چندین ساختمان از هر گونه در جامعه مدل‌سازی نشده است.

۳-۶. پیشنهادها برای کارهای آینده

۱ـ استفاده از روش‌های یادگیری ماشین برای بهبود پیش‌بینی کوتاه‌مدت؛

۲ـ انجام مطالعه‌ای جامع برای تعیین ظرفیت بهینهٔ ذخیره‌ساز اشتراکی، پنل‌های PV و حتی سیستم‌های ذخیره‌ساز انفرادی با هدف بیشینه‌سازی SS/SC و کاهش هزینه‌ها تحت سناریوهای مختلف اقلیمی و اقتصادی؛

۳ـ تعمیم روش به جامعه‌ای با تعداد بیشتری از گونه‌های ساختمانی (مدارس، فروشگاه‌ها، ساختمان‌های دولتی) با پارامترهای حرارتی واقعی و متفاوت؛

۴ـ افزودن خودروهای برقی به عنوان منابع انعطاف‌پذیری متحرک و بررسی تأثیر شارژ هوشمند دوطرفه (V2G) بر شاخص‌های SS/SCو ارائهٔ خدمات جانبی.

۴. نتیجه‌گیری

این کار، نوعی رویکرد مدیریت انرژی سلسله‌مراتبی دومرحله‌ای مبتنی بر کنترل پیش‌بینی‌کنندهٔ مدل [1]و جدید را برای انجمن انرژی محلی‌های متنوع (گونه‌های مختلف ساختمانی) شامل یک ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی ارائه کرده است. این رویکرد نه تنها خواستهٔ هر ساختمان برای هدایت بهینهٔ دستگاه‌های انرژی خود در خدمت هدف فردی خود (مرحلهٔ ۱) را برآورده می‌کند، بلکه پایداری و سازگاری با شبکهٔ انجمن انرژی محلی را که از طریق معیارهای خودکفایی و خودمصرفی بیان می‌شوند، به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد (مرحلهٔ ۲). چارچوب مبتنی بر زمان‌واقعی همچنین به انجمن انرژی محلی این «قابلیت» را داد که محدودهٔ انعطاف‌پذیری موجود خود را از طریق پوشش‌های عملیاتی کمّی‌سازی کرده و متعاقباً آن را از طریق انواع مختلف خدمات جانبی انعطاف‌پذیری بار و به‌اشتراک‌گذاری ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی به جمع‌کنندهٔ شبکه ارائه دهد.

جدا از مزایای آشکار مالی و زیست‌محیطی ثبت‌شده برای انجمن انرژی محلی در کنار مشارکت ضمنی آن در بهبود عملکرد شبکه از طریق ارائهٔ خدمات جانبی، رویکرد پیشنهادی از نظر عملکرد محاسباتی، بسیار برتر از همتای متمرکز خود عمل کرد. رویکرد سلسله‌مراتبی به‌کارگرفته‌شده، جدای از برتری در زمینهٔ حریم خصوصی و حجم تبادل اطلاعات، عملکردی سازگار و مستقل از تعداد ساختمان‌های موجود در ذخیره‌ساز انرژی اشتراکی از خود نشان داد و در نتیجه، راه را برای مقیاس‌پذیری تا موارد عملی در مقیاس بزرگ هموار کرد. تکنیک پوشش عملیاتی برای کمّی‌سازی انعطاف‌پذیری موجود در ساختمان، سهولت استفادهٔ قابل توجهی را نشان داد و ابزاری عملی برای مدیریت و رزرو انعطاف‌پذیری در زمان‌واقعی در اختیار جمع‌کنندهٔ شبکه قرار داد. در مرحلهٔ کنونی، این کار پیش‌بینی کاملاً دقیق آب و هوا را فرض می‌کند. گنجاندن عدم قطعیت‌ها در پیش‌بینی آب و هوا یک مسیر احتمالی برای کارهای آینده است. ایدهٔ جالب دیگر، بررسی اندازه‌گیری بهینهٔ دستگاه‌های انرژی و تأثیر آن بر پایداری انجمن انرژی محلی است. کار آیندهٔ دیگر، اعتبارسنجی رویکرد پیشنهادی در یک محیط عملی واقعی، با پیاده‌سازی مدل شبیه‌سازی متلب توسعه‌یافته در یک شبیه‌سازی سخت‌افزار ـ در ـ حلقه[2] با شبیه‌سازهای دیجیتال زمان واقعی است.

1. Model Predictive Control
2. Hardware-in-the-Loop (HIL)

منابع

[1] Shahee A, Abdoos M, Aslani A, Zahedi R. Reducing the energy consumption of buildings by implementing insulation scenarios and using renewable energies. Energy Informatics. 2024 Mar 11;7(1):18.

[2] Aboutorabi RS, Yousefi H, Abdoos M. A comparative analysis of the carbon footprint in green building materials: a case study of Norway. Environmental Science and Pollution Research. 2024 Oct;31(49):59320-41.

[3]Aghababaei MK, Saifoddin A, Zahedi A, Abdoos M. Macroeconomic impact of energy transition: A comparative study of developed and developing countries. Energy Strategy Reviews. 2025 Nov 1; 62:101910.

[4] Saberi N, Rad MA, Zamanpour K, Kasaeian A. Comparative techno-economic analysis of battery bank and integrated flywheel and generator in a hybrid renewable system under tropical climate. Journal of Energy Storage. 2024 Dec 1; 103:114145.

[5] Paterakis NG, Erdinç O, Pappi IN, Bakirtzis AG, Catalão JP. Coordinated operation of a neighborhood of smart households comprising electric vehicles, energy storage and distributed generation. IEEE Transactions on smart grid. 2016 Jan 8;7(6):2736-47.

[6] Fontenot H, Dong B. Modeling and control of building-integrated microgrids for optimal energy management–a review. Applied Energy. 2019 Nov 15; 254:113689.

[7] Parisio A, Wiezorek C, Kyntäjä T, Elo J, Strunz K, Johansson KH. Cooperative MPC-based energy management for networked microgrids. IEEE Transactions on Smart Grid. 2017 Aug 8;8(6):3066-74.

[8] Oh E, Son SY. Peer-to-peer energy transaction mechanisms considering fairness in smart energy communities. IEEE Access. 2020 Dec 2; 8:216055-68.

[9] Koirala B, Hakvoort R. Integrated community-based energy systems: aligning technology, incentives, and regulations. InInnovation and Disruption at the Grid's Edge 2017 Jan 1 (pp. 363-387). Academic Press.

[10] Jahangir MH, Shahsavari A, Rad MA. Feasibility study of a zero emission PV/Wind turbine/Wave energy converter hybrid system for stand-alone power supply: A case study. Journal of Cleaner Production. 2020 Jul 20;262:121250.

[11] Dong S, Kremers E, Brucoli M, Rothman R, Brown S. Techno-enviro-economic assessment of household and community energy storage in the UK. Energy Conversion and Management. 2020 Feb 1; 205:112330.

[12] Yousefi H, Ghodusinejad MH, Kasaeian A. Multi-objective optimal component sizing of a hybrid ICE+ PV/T driven CCHP microgrid. Applied Thermal Engineering. 2017 Jul 25; 122:126-38.

[13] Ghodusinejad MH, Yousefi H, Sotoodeh M. Demand forecasting and PV/EV-integrated energy system modeling for achieving a sustainable island. Sustainable Futures. 2025 Dec 1;10:100857.

[14] Rad MA, Ghasempour R, Rahdan P, Mousavi S, Arastounia M. Techno-economic analysis of a hybrid power system based on the cost-effective hydrogen production method for rural electrification, a case study in Iran. energy. 2020 Jan 1;190:116421.

[15] Abdoos M, Mobaraki MM, Yousefi H, Noroollahi Y. Evaluating zero-energy strategies in mixed-use buildings: a case study. Future Energy. 2025;4(1):8-18.

[16] Abdoos M, Yousefi H, Saifoddin A, Noorollahi Y. Technical, economic, and environmental modeling of hybrid renewable energy systems with passive design in a zero-energy urban neighborhood. Energy Conversion and Management: X. 2026 Jun 2:101999.

[17] Scarabaggio P, Carli R, Jantzen J, Dotoli M. Stochastic model predictive control of community energy storage under high renewable penetration. In2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) 2021 Jun 22 (pp. 973-978). IEEE.

[18] Paridari K, Parisio A, Sandberg H, Johansson KH. Demand response for aggregated residential consumers with energy storage sharing. In2015 54th IEEE conference on decision and control (CDC) 2015 Dec 15 (pp. 2024-2030). IEEE.

[19]Long Y, Elliott RT, Kirschen DS. Adaptive coalition formation-based coordinated voltage regulation in distribution networks. IEEE Transactions on Power Systems. 2021 Oct 14;37(3):2005-18.

[20] Dai R, Esmaeilbeigi R, Charkhgard H. The utilization of shared energy storage in energy systems: A comprehensive review. IEEE Transactions on Smart Grid. 2021 Feb 23;12(4):3163-74.
[21] Celik B, Roche R, Bouquain D, Miraoui A. Decentralized neighborhood energy management with coordinated smart home energy sharing. IEEE Transactions on Smart Grid. 2017 Jun 1;9(6):6387-97.
[22] Luthander R, Widén J, Nilsson D, Palm J. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. Applied energy. 2015 Mar 15;142:80-94.
[23] Usman M, Capitanescu F. A stochastic multi-period AC optimal power flow for provision of flexibility services in smart grids. In2021 IEEE Madrid PowerTech 2021 Jun 28 (pp. 1-6). IEEE.
[24] Gasser J, Cai H, Karagiannopoulos S, Heer P, Hug G. Predictive energy management of residential buildings while self-reporting flexibility envelope. Applied Energy. 2021 Apr 15;288:116653.
[25] Juhl R, Møller JK, Madsen H. CSTMR-Continuous times to chastic modeling in r. 2016. arXiv:1606.00242. [cited 2026 Jul 30]. Available from: http://ctsm.info/index.html
[26] Carpino C, Loukou E, Heiselberg P, Arcuri N. Energy performance gap of a nearly Zero Energy Building (nZEB) in Denmark: The influence of occupancy modelling. Building Research & Information. 2020 Nov 16;48(8):899-921.
[27] Berger C, Mahdavi A, Ampatzi E, Crosby S, Hellwig RT, Khovalyg D, Pisello AL, Roetzel A, Rysanek A, Vellei M. Thermal conditions in indoor environments: exploring the reasoning behind standard-based recommendations. Energies. 2023 Feb 4;16(4):1587.
[28] SAMSUNG SDI-ESS (Lithium-ion storage 3.6kWh) [Internet]. [cited 2021 Oct 29]. Available from: https://www.europe-solarstore.com/samsung-sdi-ess-lithiumion-storage-3-6-kwh.html
[29] Historical market data [Internet]. [cited 2021 Oct 29]. Available from: https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/
[30] Lofberg J. YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In2004 IEEE international conference on robotics and automation (IEEE Cat. No. 04CH37508) 2004 Sep 2 (pp. 284-289). IEEE.
[31] Nagpal H, Avramidis II, Capitanescu F, Heiselberg P. Optimal energy management in smart sustainable buildings–A chance-constrained model predictive control approach. Energy and Buildings. 2021 Oct 1;248:111163.