Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1 – Spring 2026
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Scheduling Shiftable Loads to Reduce Electricity Costs and Prevent Secondary Demand Peaks in a Residential Microgrid

Maryam Shahmanesh[1], *Ph.D. Student*, Seyed Razieh Malek Hosseini[*2], *Associate Professor*, Taher Niknam[3], *Associate Professor*, Karamollah Bagherifard[4], *Associate Professor*, Seyed Hadi Yaghoubian[5], *Associate Professor*

[1] Department of Computer Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran (M.shahmanesh@iau.ac.ir)
[2] Department of Computer Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran (malekhoseini.r@iau.ac.ir)
[3] Department of Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran (niknam@sutech.ac.ir)
[4] Department of Computer Engineering, Yasuj Central Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran (ka.bagherifard@iau.ac.ir)
[5] Department of Computer Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran (yahoobian.h@iau.ac.ir)

Abstract:
Scheduling flexible household loads requires balancing electricity costs, user comfort, and capacity constraints. Shifting appliance operation to cheaper periods without considering deadlines and uninterrupted consumption cycles can increase discomfort or produce infeasible schedules. This study proposes a rule-based scheduling method that incorporates each activity's operating window, duration, power profile, completion deadline, and preferred operating interval. First, the remaining slack of each activity is calculated using its deadline, current time, and execution duration, and activities with less slack receive higher priority. Candidate start times are then examined within the permitted operating window. For each candidate, the activity's power profile is added to the base load and previously scheduled activities across every interval of its uninterrupted cycle. A candidate is retained only when the capacity limit is satisfied throughout execution. Infeasible candidates are discarded, and a start time is selected from the feasible alternatives by considering electricity expenditure and deviation from the preferred interval. After each assignment, the remaining capacity is updated. Activities without a feasible start time are reported explicitly, preventing omitted demand from being interpreted as cost savings. The method is compared with least slack time scheduling, simulated annealing, and mixed-integer linear programming under common inputs and constraints. In the numerical comparison presented, the proposed method incurs a cost of USD 620 at a discomfort index of 11, corresponding to a 62.20% reduction from the USD 1,640 baseline. Its cost is respectively 31.42%, 19.27%, and 10.92% lower than the reported costs of the three comparison methods. Marginal savings analysis indicates that additional flexibility provides limited economic benefits beyond discomfort levels of approximately 10–11. Combining deadline priority, complete-cycle capacity verification, and cost-aware start-time selection therefore provides a framework for balancing electricity expenditure and scheduling discomfort while preserving uninterrupted operation of appliances.

Keywords: Flexible load scheduling; Home energy management; Deadline-based prioritization; Uninterrupted operating cycles; Capacity constraints; User discomfort; Marginal savings.

Received: 4 Apr. 2026
Revised: 15 May 2026
Accepted: 24 May 2026
*** Corresponding Author:** Dr. Seyed Razieh Malek Hosseini

Citation: M. Shahmanesh, S.R. Malek Hosseini, T, Niknam, K. Bagherifard, S.H. Yaghoubian "Scheduling Shiftable Loads to Reduce Electricity Costs and Prevent Secondary Demand Peaks in a Residential Microgrid", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 15, no. 1, pp. 107-124, June 2026 (in Persian)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

مقاله پژوهشی

زمان‌بندی بارهای قابل انتقال برای کاهش هزینه برق و جلوگیری از ایجاد پیک ثانویه در ریزشبکه مسکونی

مریم شه‌منش[۱]، دانشجوی دکتری، سید راضیه ملک حسینی[۲*]، دانشیار، طاهر نیکنام[۳]، استاد، کرم‌الله باقری‌فرد[۴]، دانشیار، سید هادی یعقوبیان[۵]، دانشیار

۱- گروه کامپیوتر، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران (M.shahmanesh@iau.ac.ir)

۲- گروه کامپیوتر، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران (malekhoseini.r@iau.ac.ir)

۳- گروه الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران (niknam@sutech.ac.ir)

۴- گروه کامپیوتر، واحد مرکزی یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران (ka.bagherifard@iau.ac.ir)

۵- گروه کامپیوتر، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران (yahoobian.h@iau.ac.ir)

چکیده: زمان‌بندی بارهای انعطاف‌پذیر خانگی مستلزم ایجاد توازن میان کاهش هزینه برق، حفظ آسایش کاربران و رعایت محدودیت ظرفیت است. انتقال فعالیت وسایل به ساعات دارای تعرفه کمتر، بدون توجه به مهلت اجرا و پیوستگی چرخه مصرف، می‌تواند موجب افزایش نارضایتی یا ایجاد برنامه‌های غیرقابل‌اجرا شود. این پژوهش روشی قاعده‌محور برای زمان‌بندی فعالیت‌های بدون وقفه ارائه می‌کند که اطلاعات پنجره فعالیت، مدت اجرا، پروفیل توان، مهلت تکمیل و زمان ترجیحی هر وسیله را در تصمیم‌گیری به‌کار می‌گیرد. ابتدا، زمان آزاد باقی‌مانده هر فعالیت با توجه به زمان تصمیم‌گیری، مهلت تکمیل و مدت اجرای آن محاسبه می‌شود و فعالیت‌های دارای زمان آزاد کمتر، اولویت بالاتری می‌یابند. سپس، زمان‌های شروع مجاز در پنجره فعالیت بررسی می‌شوند. برای هر زمان نامزد، توان فعالیت در تمام بازه‌های چرخه به بار پایه و فعالیت‌های تخصیص‌یافته افزوده می‌شود تا رعایت سقف ظرفیت در سراسر اجرا ارزیابی گردد. زمان‌های غیرمجاز حذف می‌شوند و زمان شروع از میان گزینه‌های مجاز، با توجه به هزینه برق و انحراف از بازه ترجیحی انتخاب می‌شود. پس از تخصیص هر فعالیت، ظرفیت باقی‌مانده به‌روزرسانی می‌شود؛ فعالیت‌های فاقد زمان شروع مجاز نیز گزارش می‌شوند تا کاهش هزینه ناشی از حذف بار پنهان نماند. عملکرد روش با کمترین زمان آزاد، تبرید شبیه‌سازی‌شده و برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط، تحت ورودی‌ها و قیود مشترک مقایسه می‌شود. در مقایسه عددی ارائه‌شده، هزینه روش پیشنهادی در شاخص نارضایتی ۱۱ برابر با ۶۲۰ دلار است؛ این مقدار نسبت به هزینه مبنای ۱۶۴۰ دلار، ۶۲٫۲۰ درصد کاهش دارد و از هزینه سه روش مقایسه‌ای، به‌ترتیب ۳۱٫۴۲، ۱۹٫۲۷ و ۱۰٫۹۲ درصد کمتر است. تحلیل صرفه‌جویی حاشیه‌ای نشان می‌دهد که پس از محدوده نارضایتی ۱۰ تا ۱۱، منفعت اقتصادی افزایش انعطاف‌پذیری محدود می‌شود. بنابراین، ترکیب اولویت مهلت، بررسی ظرفیت کامل چرخه و انتخاب اقتصادی زمان شروع، چارچوبی برای مدیریت هم‌زمان هزینه و نارضایتی فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: زمان‌بندی بار انعطاف‌پذیر، مدیریت انرژی خانگی، اولویت‌بندی بر اساس مهلت؛ چرخه‌های بدون وقفه، محدودیت ظرفیت، نارضایتی کاربر، صرفه‌جویی حاشیه‌ای.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۳

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر سید راضیه ملک حسینی

نشانی نویسنده مسئول: یاسوج، کیلومتر ۴ جاده سی سخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج، دانشکده فنی، گروه کامپیوتر

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

۱- مقدمه

افزایش استفاده از تجهیزات برقی در ساختمان‌های مسکونی و گسترش منابع تولید پراکنده، توجه به مدیریت زمان مصرف برق را در کنار مقدار مصرف ضروری کرده است. در شبکه‌های توزیع، هم‌زمانی فعالیت وسایل خانگی می‌تواند تقاضای توان را در برخی ساعات افزایش دهد، درحالی‌که بخش دیگری از روز با ظرفیت استفاده نشده همراه است. این تفاوت زمانی، امکان بهره‌برداری متعادل از تجهیزات شبکه را محدود می‌کند و می‌تواند هزینه تأمین برق و نیاز به ظرفیت اضافی را افزایش دهد. ریزشبکه‌های مسکونی بستری برای هماهنگی بارهای محلی و منابع انرژی فراهم می‌کنند و مدیریت سمت تقاضا یکی از ابزارهای بهبود بهره‌برداری آن‌هاست. سامانه مدیریت انرژی خانگی نیز با دریافت اطلاعات وسایل، تعرفه برق و ترجیحات مصرف‌کننده، زمان فعالیت تجهیزات قابل‌کنترل را تنظیم می‌کند [۱]. در این چارچوب، جابه‌جایی بار به معنای انتقال زمان انجام یک فعالیت به بازه‌ای مناسب‌تر است؛ بنابراین، کاهش توان مصرفی در یک ساعت لزوماً به معنای کاهش انرژی موردنیاز آن فعالیت نیست. مرور پژوهش‌های انتقال بار در سطح وسایل خانگی نشان می‌دهد که شناخت تجهیزات قابل انتقال و محدودیت‌های استفاده از آن‌ها، برای ارزیابی ظرفیت انعطاف‌پذیری مصرف اهمیت دارد [۲]. این ظرفیت می‌تواند در یک خانه یا مجموعه‌ای از خانه‌ها به کار گرفته شود و در صورت وجود تولید خورشیدی، به هماهنگی بهتر مصرف با انرژی محلی کمک کند.

پژوهش موتا و همکاران زمان‌بندی مصرف را در یک جامعه مسکونی دارای اشتراک انرژی خورشیدی بررسی کرده است [۳]. یکی از سازوکارهای متداول برای تشویق چنین تغییراتی، تعرفه زمان استفاده است که قیمت برق را در بازه‌های مختلف روز متفاوت تعیین می‌کند. مصرف‌کننده با انتقال فعالیت‌های انعطاف‌پذیر به ساعات ارزان‌تر می‌تواند هزینه خود را کاهش دهد اما میزان مشارکت به عادت‌های مصرف، شناخت تعرفه و پذیرش کنترل خودکار وابسته است. مطالعه دومان و همکاران نشان می‌دهد که تمایل به مشارکت و صرفه‌جویی اقتصادی حاصل از مدیریت انرژی، میان خانوارها یکسان نیست [۴]. همچنین، مطالعه میدانی کایزر و همکاران، تعرفه‌های متغیر زمانی و کنترل خودکار بار را برای کاهش پیک در سطح ترانسفورماتور بررسی کرده است [۵]. با این وجود، سیگنال قیمت به تنهایی زمان‌بندی مناسب مصرف را تعیین نمی‌کند؛ زیرا چند وسیله یا چند خانوار ممکن است یک بازه ارزان مشترک را انتخاب کنند.

برای مثال، شروع هم‌زمان ماشین لباس‌شویی، ماشین ظرف‌شویی و سایر فعالیت‌های قابل‌انتقال در ابتدای ساعات کم‌باری می‌تواند بخشی از تقاضا را در همان بازه متمرکز کند. در این وضعیت، پیک اولیه کاهش می‌یابد، اما یک پیک ثانویه در زمان دیگری شکل می‌گیرد. منظور از پیک ثانویه در این پژوهش، تمرکز جدید توان ناشی از انتقال بارها به ساعات مقصد است و وقوع آن به مقدار بار پایه، ظرفیت اتصال و میزان هم‌زمانی فعالیت‌ها بستگی دارد. ازاین‌رو، کاهش هزینه برق باید همراه با کنترل توان تجمعی بررسی شود. پژوهش شواله و همکاران، هزینه و نسبت پیک به متوسط را در زمان‌بندی وسایل با استفاده از مدل کوله‌پشتی چندگانه در نظر گرفته است [۶]. پاندا و همکاران نیز اولویت‌بندی بارها را در مدیریت انرژی مسکونی دارای منابع تجدیدپذیر بررسی کرده‌اند [۷]. این مطالعات نشان می‌دهند که ارتباط میان اهداف اقتصادی و الگوی زمانی تقاضا، پیش‌تر مورد توجه بوده است و مسئله حاضر باید با تمرکز بر یک سازوکار مشخص و دامنه ارزیابی روشن دنبال شود.

در کنار محدودیت توان، رعایت زمان موردنظر مصرف‌کننده نیز اهمیت دارد. امکان انتقال یک فعالیت به معنای آزادی کامل در انتخاب زمان آن نیست؛ هر وسیله ممکن است زودترین زمان شروع، آخرین زمان پایان و مدت فعالیت مشخصی داشته باشد. افزون بر این، برخی وسایل پس از شروع باید چرخه خود را بدون وقفه تکمیل کنند. پیشنهادهای زمان استفاده نیز زمانی قابلیت پذیرش بیشتری دارند که با شرایط روزمره کاربران سازگار باشند؛ مطالعه ملاخاتکا و همکاران درباره پیشنهاد زمان فعالیت ماشین ظرف‌شویی، نقش پذیرش و موانع رفتاری را بررسی کرده است [۸]. بارسانتی و همکاران نیز تفاوت ترجیحات خانوارها را در انتقال مصرف تحت سناریوهای هزینه، ازدحام شبکه و دسترسی به انرژی تجدیدپذیر نشان داده‌اند [۹]. بنابراین، زمان‌بندی صرفاً بر مبنای کمترین قیمت ممکن است به تأخیر نامناسب یا محدودشدن استفاده از وسیله منجر شود. کامیاب، اختلاف زمان فعالیت وسایل با زمان ترجیحی کاربران را در قالب شاخص نارضایتی وارد مسئله زمان‌بندی کرده است [۱۰].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

فایا و همکاران نیز مدیریت انرژی ساختمان مسکونی را با محاسبه نارضایتی ناشی از انتقال بار و حضور ذخیره‌ساز خانگی بررسی کرده‌اند [۱۱]. علاوه بر ترجیحات زمانی، نحوه نمایش توان مصرفی تجهیزات بر نتیجه اثر می‌گذارد؛ استفاده از یک مقدار متوسط ممکن است تغییرات توان طی چرخه فعالیت را به طور کامل نشان ندهد. پژوهش ویبهوت و همکاران بر بهبود مدل تقریب بار و بررسی پیامد آن برای هزینه و زمان‌بندی تمرکز دارد [۱۲]. مدل‌سازی الگوهای رفتاری در زمان‌بندی وسایل نیز در پژوهش لین و همکاران مورد توجه قرار گرفته است [۱۳]. همچنین، پژوهش زیتون و همکاران، تفاوت بارهای وقفه‌پذیر و وقفه‌ناپذیر و عدم‌قطعیت‌های مؤثر بر هزینه و آسایش را در یک مدل مدیریت انرژی بررسی کرده است [۱۴]. در مقابل پیچیدگی مدل‌ها، زمان محاسبه نیز باید متناسب با کاربرد باشد؛ پژوهش الهیاری و جوشکی بر تصمیم‌گیری سریع برای بار تجمیعی مسکونی و ذخیره‌ساز تأکید دارد [۱۵].

بر این اساس، مسئله این مقاله طراحی و ارزیابی یک قاعده زمان‌بندی است که انتقال بار به ساعات ارزان را با ظرفیت باقی‌مانده و مهلت فعالیت وسایل هماهنگ کند. در روش پیشنهادی، بارهای غیرقابل‌انتقال به‌صورت بار پایه وارد مدل می‌شوند و برای هر فعالیت قابل‌انتقال، توان، مدت کار، بازه مجاز و زمان دلخواه شروع تعریف می‌شود. اولویت بررسی فعالیت‌ها با توجه به فاصله تا آخرین زمان مجاز شروع تعیین می‌شود و انتخاب زمان اجرا، با درنظرگرفتن قیمت برق، تأخیر نسبت به زمان دلخواه و توان تجمعی انجام می‌گیرد. برای فعالیت‌های وقفه‌ناپذیر، ظرفیت در تمام بازه اجرای چرخه بررسی می‌شود تا پذیرش یک شروع، موجب عبور از سقف توان در مراحل بعدی نشود. هدف، ارائه الگوریتمی با ادعای بهینگی عمومی نیست، بلکه سنجش کارایی یک سازوکار مشخص در شرایط تعریف شده است. نوآوری‌های مقاله به شرح زیر است:

۱. طراحی یک قاعده زمان‌بندی با لحاظ مهلت، هزینه و تأخیر: فعالیت‌ها براساس زمان باقی‌مانده تا آخرین شروع مجاز اولویت‌بندی می‌شوند و زمان اجرای آن‌ها با درنظرگرفتن هزینه برق و فاصله از زمان ترجیحی کاربر انتخاب می‌شود. سهم مقاله، پیاده‌سازی و ارزیابی این سازوکار مشترک با پیچیدگی محاسباتی محدود است.

۲. کنترل پذیرش فعالیت براساس ظرفیت باقی‌مانده در تمام چرخه اجرا: برای هر زمان شروع پیشنهادی، مجموع بار پایه و فعالیت‌های پذیرفته‌شده در سراسر چرخه وسیله بررسی می‌شود. این سازوکار، انتقال مصرف به ساعات ارزان را با سقف توان هماهنگ می‌کند و امکان جلوگیری از پیک ثانویه را در شرایط تعریف‌شده می‌سنجد.

ادامه مقاله به این شرح است: بخش ۲ پیشینه پژوهش، مزایا و معایب آن‌ها را بررسی می‌کند. بخش ۳ روش پیشنهادی مقاله را شرح می‌دهد. در بخش ۴، نحوه انجام آزمایش و نتایج ارائه می‌شود. بخش ۵ نتیجه‌گیری مقاله و کارهای آینده را بررسی می‌کند.

۲- پیشینه پژوهش

زمان‌بندی بارهای قابل انتقال در بخش مسکونی، با مجموعه‌ای از اهداف مرتبط و گاه متعارض روبه‌رو است. انتقال فعالیت وسایل به ساعات ارزان‌تر می‌تواند هزینه برق را کاهش دهد، اما اگر چند فعالیت یک بازه مشترک را انتخاب کنند، تمرکز مصرف در ساعات مقصد افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، جابه‌جایی بیش از حد زمان فعالیت با برنامه روزانه کاربران سازگار نیست. بنابراین، ارزش یک روش زمان‌بندی به نحوه برقراری تعادل میان هزینه، توان تجمعی و محدودیت‌های زمانی بستگی دارد. پژوهش‌های سال‌های اخیر این تعادل را از مسیرهای مختلفی دنبال کرده‌اند؛ برخی بر صورت‌بندی دقیق مسئله تأکید دارند و برخی، سادگی اجرا یا سازگاری با تغییر شرایط را در اولویت قرار می‌دهند. بررسی این مسیرها، مبنای انتخاب روش و طراحی مقایسه‌های مقاله حاضر است.

در رویکردهای مبتنی بر بهینه‌سازی ریاضی، ارتباط میان اهداف مصرف‌کننده و شبکه به‌صورت صریح وارد مدل می‌شود. یحیی و پرادهان [۱۶] با برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط چندهدفه، هزینه، نارضایتی ناشی از تغییر برنامه و پیک بار را برای یک

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

یا چند خانوار بررسی کردند. استفاده از مجموع وزنی، اولویت‌بندی اهداف و بهینه‌سازی سازشی، امکان انتخاب برنامه متناسب با ترجیحات را فراهم می‌کرد.

سرنا و کنترراس [۲۰] همین تعارض اقتصادی و عملیاتی را با تمرکز مستقیم بر پیک جدید ساعات کم‌تعرفه دنبال کردند. مدل آن‌ها با بهبود ضریب بار و کنترل هم‌زمانی وسایل پرمصرف، هزینه مصرف‌کننده و شرکت برق را در نظر می‌گرفت؛ زمان استفاده نامطمئن نیز با مونت‌کارلو بررسی شد. کنار هم قرارگرفتن این دو مطالعه نشان می‌دهد که کاهش هزینه و کنترل پیک باید در یک مدل مشترک ارزیابی شوند. صورت‌بندی دقیق، مزیت این دسته است، هرچند تعیین ترجیحات، انتخاب مصالحه اهداف و افزایش اندازه مدل می‌تواند اجرای مکرر حل را دشوارتر کند.

ورود محدودیت ظرفیت به مسئله، توجه را از انتخاب ساعت ارزان به امکان اجرای واقعی برنامه منتقل می‌کند. شواله و همکاران [۶] با نگاشت وسایل و بازه‌های زمانی به مسئله کوله‌پشتی چندگانه، سقف مصرف هر بازه را در تخصیص بار لحاظ کردند. در این چارچوب، مسئله کوله‌پشتی چندگانه با پیاده‌سازی ترتیبی[۱] (MKSI) برای اجرای بدون وقفه و مسئله کوله‌پشتی چندگانه با پیاده‌سازی موازی[۲] (MKPI) برای اجرای وقفه‌پذیر معرفی شد و هزینه و نسبت پیک به متوسط ارزیابی شدند. تابوه و همکاران [۲۸] نیز کران مصرف وابسته به زمان را در روش‌های ابتکاری برای وسایل دارای انعطاف زمانی یا توانی بررسی کردند. تفاوت این مطالعات نشان می‌دهد که سقف ظرفیت باید همراه با نوع انعطاف وسیله تعریف شود؛ آزادی تغییر توان با آزادی جابه‌جایی زمان یکسان نیست. همچنین، بازه‌های ساعتی مطالعه نخست ممکن است تغییرات کوتاه‌مدت توان را پنهان کنند و شاخص نارضایتی مبتنی بر زمان پایان در مطالعه دوم، تمام ترجیحات شروع فعالیت را پوشش نمی‌دهد. از این رو، انتخاب تفکیک زمانی و تعریف آسایش بر قابلیت استفاده برنامه اثر دارد. برای نمونه، مجازبودن توان در لحظه شروع، برای یک وسیله وقفه‌ناپذیر کافی نیست؛ ظرفیت باید در تمام مدت اجرای آن فراهم باشد. این تمایز، حلقه ارتباط میان محدودیت ظرفیت و مدل چرخه مصرف است.

ویبهوت و همکاران [۱۲] نشان دادند که نمایش بار با توان متوسط یا نامی می‌تواند بر برآورد قله‌ها و فرورفتگی‌های منحنی مصرف اثر بگذارد؛ بنابراین، مدل توان چرخه‌ای و روش‌های حل متمرکز و غیرمتمرکز را برای بررسی هزینه و نارضایتی پیشنهاد کردند. اهمیت این مطالعه برای کنترل پیک آن است که امکان‌پذیری یک زمان شروع باید با مصرف مراحل بعدی فعالیت سازگار باشد. البته استفاده از پروفیل دقیق‌تر، اطلاعات بیشتری درباره تجهیزات می‌طلبد. در نتیجه، دقت مدل بار و هزینه تهیه داده باید متناسب با دامنه کاربرد انتخاب شوند؛ برای یک زمان‌بندی محدود، پیچیدگی بیشتر زمانی توجیه دارد که بر کیفیت برنامه اثر قابل‌اندازه‌گیری بگذارد.

در کنار مدل تجهیزات، نحوه شناخت ترجیحات مصرف‌کننده مسیر دیگری برای بهبود زمان‌بندی بوده است. پامولاپاتی و همکاران [۱۷] رضایت کاربران را از الگوهای مصرف گذشته استخراج کردند و با الگوریتم تکاملی چندهدفه و وزن اولویت وسایل، برنامه‌های سازشی و قابل‌اصلاح ارائه دادند. آپایدین اوزکان [۱۸] در سیستم مدیریت انرژی خانگی مبتنی بر زمان‌بندی لوازم خانگی[۳] (AS-REMS)، میان وسایل تحت کنترل سامانه و وسایل تحت کنترل کاربر تمایز گذاشت و زمان‌های شروع را براساس عادت‌های ثبت‌شده اولویت‌بندی کرد؛ حل مسئله نیز با الگوریتم جستجوی فراگیر[۴] برای یافتن نزدیک‌ترین جفت انجام شد. در مقیاس جامعه مسکونی، فن و همکاران [۲۶] ناهمگونی کاربران را با خوشه‌بندی فازی و تمایل به پرداخت وارد چارچوب بازی با تعادل نش کردند. این سه مسیر، به‌ترتیب بر استخراج ترجیحات، حفظ اختیار کاربر و تفاوت اقتصادی خانوارها تأکید دارند. بااین‌حال، وابستگی به تاریخچه معتبر، احتمال تغییر عادت‌ها و نیاز به برآورد تمایل به پرداخت، استفاده مستقیم از آن‌ها را برای سامانه‌ای با اطلاعات محدود دشوار می‌کند.

برای جست‌وجوی برنامه‌های مناسب در فضای بزرگ تصمیم، الگوریتم‌های فراابتکاری نیز به‌کار گرفته شده‌اند. موتا و همکاران [۲۲] عملگر ترکیب ویژه‌ای در الگوریتم ژنتیک طراحی کردند تا پنجره زمانی و ترتیب فعالیت‌ها در پاسخگویی بار رعایت شود. استفاده از داده واقعی نقطه قوت مطالعه بود، اما بررسی چهار وسیله طی پنج روز، تعمیم عملکرد را به ارزیابی بیشتر وابسته می‌کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

در [۲۱] ترکیب ازدحام ذرات[۵] (PSO) و نسخه دودویی آن را با خوشه‌بندی ترجیحات، تولید خورشیدی، باتری و خودرو برقی همراه کردند و اجرای سامانه را روی رزبری‌پای سنجیدند. گویل و وادهرا [۲۴] نیز کاهش هزینه و پیک را در یک ساختار دومرحله‌ای با جست‌وجوی فاخته[۶]، ترکیب ژنتیک و ازدحام ذرات و جست‌وجوی فاخته تطبیقی بررسی کردند. انعطاف این روش‌ها در مواجهه با اهداف و قیود متنوع سودمند است، ولی کیفیت جواب، زمان محاسبه و حساسیت تنظیمات باید هم‌زمان گزارش شوند؛ زیرا عملکرد یک اجرای منتخب، برای قضاوت درباره جست‌وجوی تصادفی کافی نیست.

در روش‌هایی که اولویت فعالیت را مستقیماً وارد تصمیم می‌کنند، ارتباط روشن‌تری میان مهلت کار و انتخاب برنامه برقرار می‌شود. شاردا و همکاران [۱۹] زمان‌بندی بلادرنگ مبتنی بر کمترین زمان آزاد[۷] (LST) را با تولید خورشیدی و تجهیزات اینترنت اشیا در بازه‌های پنج‌دقیقه‌ای ارائه کردند. پاندا و همکاران [۷] اولویت بارها را در جست‌وجوی ازدحام سالپ تطبیقی برای سامانه دارای منابع تجدیدپذیر به کار گرفتند. جاسم و همکاران [۲۵] کنترل‌کننده مدیریت انرژی مبتنی بر هیوریستیک قابل برنامه‌ریزی[۸] (PHEMC) را با ملاحظات هزینه، نسبت پیک به متوسط، آسایش و کربن معرفی کردند. این مطالعات، کاربرد اولویت و قواعد کنترلی را در کنار بهینه‌سازی نشان می‌دهند؛ با این حال، فوریت فعالیت به‌تنهایی کیفیت اقتصادی کل برنامه را تعیین نمی‌کند. افزون بر وابستگی اجرای بلادرنگ به ارتباطات و پیش‌بینی، لازم است نتایج شبیه‌سازی در محدوده سناریوها تفسیر شوند و کاهش هزینه ناشی از انتقال زمانی با کاهش انرژی مصرفی یکسان تلقی نشود.

نمایش روشن هزینه زمانی جابه‌جایی نیز می‌تواند انتخاب برنامه را برای کاربر قابل‌فهم‌تر کند. کامیاب [۱۰] اختلاف زمان شروع و پایان فعالیت با زمان ترجیحی را در شاخص نارضایتی وارد کرد و مجموع وزنی هزینه و نارضایتی را با تبرید شبیه‌سازی‌شده حل نمود. تعیین سقف مجاز نارضایتی، امکان بررسی میزان صرفه‌جویی در برابر تغییر برنامه را فراهم می‌کرد. این ساختار برای مسئله حاضر قابل‌استفاده است، زیرا به‌جای استخراج پیچیده عادت‌ها، از ترجیحات زمانی مشخص بهره می‌گیرد. در عین حال، حساسیت به برنامه سردکردن و نبود تضمین عمومی بهینگی، ضرورت تکرار اجراها را ایجاد می‌کند؛ کنترل پیک نیز باید در مدل مقایسه به‌صورت صریح لحاظ شود.

هنگامی که شرایط محیط و رفتار مصرف‌کننده متغیر باشند، روش‌های یادگیری و مدیریت عدم‌قطعیت اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. لی و همکاران [۲۳] زمان‌بندی را به فرایند تصمیم‌گیری مارکوف تبدیل کرده و با یادگیری تقویتی عمیق مبتنی بر آنتروپی، مصالحه منفعت و رضایت را دنبال کردند. پن و همکاران [۲۹] گرادیان سیاست قطعی عمیق[۹] (DDPG) را برای بارهای وقفه‌پذیر و وقفه‌ناپذیر، ذخیره‌ساز و آسایش حرارتی به کار گرفتند. تصمیم سریع پس از آموزش، امتیاز این مسیر است، اما هزینه آموزش و رعایت مستقل قیود باید بررسی شود.

در مسیر مدل‌محور، شیونگ و همکاران [۲۷] رفتار خودرو را با بهینه‌سازی تصادفی و عدم‌قطعیت قیمت و تولید خورشیدی را با بهینه‌سازی مقاوم مدیریت کردند. زیتون و همکاران [۱۴] این دامنه را با برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط[۱۰] (MILP) مقاوم، مدت فعالیت نامطمئن و پروفیل‌های متنوع توان گسترش دادند. پوشش شرایط نامطمئن در این مطالعات ارزشمند است؛ بااین‌حال، تعیین سناریوها، مجموعه‌های عدم‌قطعیت و پارامترهای تجهیزات، نیاز اطلاعاتی و پیچیدگی بیشتری نسبت به زمان‌بندی قطعی ایجاد می‌کند. انتخاب این چارچوب‌ها باید با اطلاعات واقعاً در دسترس تناسب داشته باشد؛ افزودن عدم‌قطعیت بدون داده معتبر، لزوماً ارزیابی واقع‌گرایانه‌تری ایجاد نمی‌کند.

تفاوت دامنه و اطلاعات مورد استفاده در روش‌های زمان‌بندی، مقایسه عملکرد آن‌ها را به یک مسئله مستقل تبدیل می‌کند. ون‌درلیندن و همکاران [۳۰]، هفت الگوریتم زمان‌بندی بار انعطاف‌پذیر را با توجه به تغییر اطلاعات در طول زمان مقایسه کردند. اهمیت این مطالعه برای پژوهش حاضر، تأکید بر یکسان‌بودن اطلاعات قابل‌دسترسی و شرایط ارزیابی است. بر همین اساس، روش پیشنهادی با سه روش LST مبتنی بر [۱۹]، تبرید شبیه‌سازی‌شده[۱۱] (SA) مبتنی بر [۱۰] و MILP مبتنی بر [۲۰]، در نسخه‌های سازگار با مسئله مشترک مقایسه خواهد شد. جدول (۱) مزایا و معایب کارهای گذشته را خلاصه می‌کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

Table(1): Summary of previous work

جدول (۱): خلاصه کارهای گذشته

مرجع	روش	مزایا	معایب
[۲۴]	بهینه‌سازی دومرحله‌ای؛ CS، GA-PSO و ACS	کنترل هزینه و پیک؛ تعیین آستانه مصرف	حساسیت به تنظیمات، آستانه و تعرفه
[۲۵]	کنترل‌کننده ابتکاری HPEMC	انعطاف کنترل ریزشبکه ترکیبی	محدودیت تعمیم نتایج شبیه‌سازی؛ انتقال زمانی تضمین کاهش انرژی نیست
[۲۶]	خوشه‌بندی فازی، تمایل به پرداخت و بازی نش	لحاظ ناهمگونی کاربران؛ کاهش تبادل داده	نیاز به برآورد ترجیحات اقتصادی و هماهنگی
[۶]	کوله‌پشتی چندگانه؛ MKSI/MKPI	سقف مصرف؛ تفکیک اجرای وقفه‌پذیر و بدون وقفه	نمایش محدود تغییرات درون ساعت
[۷]	ازدحام سالپ تطبیقی با اولویت بار	لحاظ اولویت و منابع تجدیدپذیر	حساسیت تنظیمات؛ تغییرپذیری جواب در اجراها
[۲۷]	بهینه‌سازی ترکیبی مقاوم و تصادفی	تفکیک عدم‌قطعیت‌ها؛ تنظیم محافظه‌کاری	نیاز به سناریو و مجموعه عدم‌قطعیت؛ هزینه محافظه‌کاری
[۲۸]	ابتکاری با کران مصرف وابسته به زمان	کنترل ظرفیت؛ مصالحه هزینه و نارضایتی	محدودیت شاخص نارضایتی مبتنی بر زمان پایان
[۲۹]	DDPG برای بار و ذخیره‌ساز	تصمیم سریع پس از آموزش؛ آسایش حرارتی	پیچیدگی آموزش و تنظیم شبکه
[۱۰]	تبرید شبیه‌سازی‌شده	شاخص زمانی روشن؛ جست‌وجوی نسبتاً ساده	حساسیت به سردکردن؛ ضرورت کنترل صریح پیک
[۱۲]	مدل توان چرخه‌ای؛ حل متمرکز و غیرمتمرکز	تقریب بهتر مصرف و پیک	نیاز به داده و پارامترهای جزئی‌تر
[۱۴]	MILP مقاوم چندهدفه	طبقه‌بندی واقع‌گرایانه؛ چند منبع عدم‌قطعیت	نیاز به پارامترها و تعیین مجموعه‌های عدم‌قطعیت

۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی برای زمان‌بندی فعالیت وسایل خانگی قابل‌انتقال در یک افق زمانی محدود طراحی شده است. این روش، فعالیت‌های دارای فرصت کمتر برای جابه‌جایی را زودتر بررسی می‌کند و برای هر فعالیت، زمان شروع را با توجه به هزینه برق، فاصله از زمان ترجیحی کاربر و ظرفیت باقی‌مانده انتخاب می‌کند. ویژگی اصلی سازوکار پذیرش آن است که امکان اجرای فعالیت در تمام چرخه مصرف بررسی می‌شود. بنابراین، یک زمان شروع تنها هنگامی پذیرفته می‌شود که اجرای کامل وسیله، بدون توقف و بدون عبور از سقف توان، امکان‌پذیر باشد. در این مدل، اطلاعات فعالیت‌ها، تعرفه و بار پایه پیش از زمان‌بندی در دسترس هستند و تصمیم‌ها برای کل افق برنامه‌ریزی گرفته می‌شوند. هر فعالیت بیانگر یک نوبت استفاده از یک وسیله مستقل است و برای هر وسیله در افق مورد بررسی، یک فعالیت تعریف می‌شود. مدل حاضر قطعی است و برای فعالیت‌های بدون وقفه تعریف می‌شود. تولید خورشیدی، ذخیره‌ساز، وابستگی میان فعالیت‌ها و محدودیت آسایش حرارتی در این صورت‌بندی وارد نشده‌اند. چند نوبت استفاده از یک وسیله نیز به افزودن قید عدم هم‌پوشانی نیاز دارد.

۳-۱- تعریف افق زمانی و اطلاعات فعالیت‌ها

افق برنامه‌ریزی به T بازه با طول یکسان تقسیم می‌شود. مجموعه بازه‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

$$\Omega = \{0,1....T-1\}, \quad H = T\,\Delta t \tag{۱}$$

در رابطه (۱)، Ω مجموعه بازه‌های زمانی، T تعداد بازه‌ها، Δt طول هر بازه برحسب ساعت و H طول افق برنامه‌ریزی برحسب ساعت است. برای نمونه، یک افق ۲۴ساعته با بازه‌های ۱۵دقیقه‌ای، شامل ۹۶ بازه است. مجموعه فعالیت‌ها با $I = \{1, \dots N\}$ نمایش داده می‌شود. برای فعالیت i، زودترین شروع مجاز r_i، مهلت پایان d_i، تعداد بازه‌های اجرا m_i، زمان شروع ترجیحی θ_i و پروفیل توان $P_i = \{P_{i,0}, \dots . P_{i,m-1}\}$ مشخص هستند. زمان‌های شروع و پایان برحسب مرز بازه‌ها تعریف می‌شوند؛ اگر فعالیت در s شروع شود، بازه‌های s تا $s + m_i - 1$ را اشغال می‌کند و در مرز $s + m_i$ پایان می‌یابد. توان هر مرحله برحسب کیلووات ثبت می‌شود. پروفیل ثابت، حالت خاص این نمایش است که توان همه مراحل در آن برابر است. مجموعه زمان‌های شروع مجاز برای هر فعالیت به شکل زیر به دست می‌آید:

$$A_i(\tau) = \{s \in Z : \max\{0, r_i, \tau\} \le s \le \min\{d_i - m_i, T - m\}\} \tag{۲}$$

در رابطه (۲)، $A_i(\tau)$ مجموعه شروع‌های مجاز فعالیت i، s شاخص شروع، Z مجموعه اعداد صحیح و τ مرز زمانی برنامه‌ریزی است. در برنامه‌ریزی کل افق، $\tau = 0$ در نظر گرفته می‌شود و در مراحل تخصیص تغییر نمی‌کند؛ مراحل تخصیص، گذر زمان واقعی نیستند. شرط بالای مجموعه، پایان کامل فعالیت را پیش از مهلت و خروج نکردن آن از افق تضمین می‌کند. اگر این مجموعه تهی باشد، فعالیت از نظر زمانی قابل‌برنامه‌ریزی نیست. زمان ترجیحی باید در مجموعه شروع‌های اولیه قرار داشته باشد و ناسازگاری ورودی باید پیش از اجرا اصلاح یا گزارش شود.

۳-۲- متغیرهای تصمیم و مدل بار تجمعی

برای نمایش یک برنامه، متغیر شروع و متغیر تکمیل فعالیت به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$x_{i,s} \in \{0,1\}, \qquad y_i \in \{0,1\}, \qquad \sum_{s \in A_i(\tau)} x_{i,s} = y_i \tag{۳}$$

در رابطه (۳)، $x_{i,s} = 1$ نشان می‌دهد فعالیت i در بازه s شروع شده است و $y_i = 1$ بیانگر تخصیص کامل آن فعالیت است. مقدار صفر y_i نشان می‌دهد فعالیت در برنامه قرار نگرفته است. تساوی رابطه تضمین می‌کند هر فعالیت پذیرفته‌شده دقیقاً یک بار شروع شود. برای مجموعه تهی، مجموع برابر صفر است و فعالیت پذیرفته نمی‌شود. سهم توان یک فعالیت در صورت شروع در s به‌شکل زیر نوشته می‌شود:

$$q_i(t;s) = \begin{cases} p_{i,t-s} & s \le t \le s + m_i \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{۴}$$

در رابطه (۴)، $q_i(t;s)$ توان فعالیت i در بازه t هنگام شروع در s و $p_{i,t-s}$ توان مرحله متناظر در پروفیل مصرف است. این رابطه، پیوستگی چرخه اجرا و ترتیب مراحل مصرف را حفظ می‌کند. با اضافه‌شدن فعالیت‌ها به بار پایه، توان کل هر بازه برابر است با:

$$L_t = b_t + \sum_{i \in I} \sum_{s \in A_i(\tau)} q_i(t;s) x_{i,s}, \quad t \in \Omega \tag{۵}$$

در رابطه (۵)، L_t توان کل خانوار و b_t توان بار پایه در بازه t هستند. بار پایه شامل مصارف خارج از تصمیم زمان‌بندی است. همه مقادیر توان برحسب کیلووات بیان می‌شوند. اگر چند فعالیت هم‌زمان اجرا شوند، توان آن‌ها در بازه مشترک با هم جمع می‌شود. محدودیت توان برای تمام بازه‌ها اعمال می‌شود:

$$L_t \le P_t^{\max} \quad t \in \Omega \tag{۶}$$

در رابطه (۶)، P_t^{max} سقف توان مجاز در بازه t است. این سقف می‌تواند ثابت یا وابسته به زمان باشد. ورودی معتبر باید بار پایه‌ای داشته باشد که به‌تنهایی از سقف توان عبور نکند؛ در غیر این صورت، اضافه‌نکردن فعالیت‌ها نیز مسئله را امکان‌پذیر

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

نمی‌کند و ناسازگاری باید گزارش شود. این قید از عبور برنامه تولیدشده از سقف تعریف‌شده جلوگیری می‌کند، اما به‌تنهایی تضمین‌کننده کمینه‌بودن پیک نیست.

۳-۳- هزینه برق و انحراف از زمان ترجیحی

هزینه کل برنامه و هزینه اجرای هر فعالیت در یک شروع مشخص به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$C_{total} = \Delta t \sum_{t\in\Omega} \pi_t \; L_t \qquad C_i(s) = \Delta t \sum_{l=0}^{m_i-1} \pi_{s+l} \; p_{i,l} \tag{۷}$$

در رابطه (۷)، C_{total} هزینه انرژی کل برنامه، $C_i(s)$ هزینه فعالیت i هنگام شروع در s و $p_{i,l}$ تعرفه برق در بازه t برحسب واحد پول بر کیلو وات ساعت است. ضرب توان در طول بازه، انرژی مصرفی را به دست می‌دهد. بنابراین، زمان شروع براساس هزینه تمام چرخه ارزیابی می‌شود. هزینه بار پایه میان روش‌ها ثابت است، اما برای گزارش هزینه کل در نظر گرفته می‌شود. تعرفه در این صورت‌بندی غیرمنفی و از پیش معلوم فرض می‌شود. نارضایتی زمانی با فاصله شروع انتخاب‌شده از زمان ترجیحی بیان می‌شود:

$$D_i(s) = \Delta t \left| s - \theta_i \right| \tag{۸}$$

در رابطه (۸)، $D_i(s)$ انحراف زمانی فعالیت i برحسب ساعت است. قدرمطلق، اجرای زودتر و دیرتر از ترجیح را به صورت متقارن جریمه می‌کند. این شاخص فقط ترجیح زمانی را مدل می‌کند و معادل سنجش کامل آسایش کاربر نیست. تأخیر مثبت، برای گزارش نتایج، جداگانه به عنوان فاصله شروع‌های دیرتر از ترجیح محاسبه می‌شود. برای ترکیب هزینه و انحراف زمانی، دو شاخص در مجموعه شروع‌های اولیه مقیاس‌بندی می‌شوند:

$$\hat{C}_i(s) = \frac{C_i(s) - C_i^{\min}}{\max\left\{C_i^{\max} - C_i^{\min}, \varepsilon\right\}}, \qquad \hat{D}_i(s) = \frac{D_i(s)}{\max\left\{C_i^{\max}, \Delta t\right\}} \tag{۹}$$

در رابطه (۹)، $\hat{C}_i(s)$ هزینه مقیاس‌بندی‌شده و $\hat{D}_i(s)$ انحراف زمانی مقیاس‌بندی‌شده هستند. C_i^{min} و C_i^{max} کمترین و بیشترین هزینه و D_i^{max} بیشترین انحراف زمانی در $A_i(\tau)$ هستند. ϵ یک مقدار مثبت کوچک با واحد هزینه است که از تقسیم بر صفر جلوگیری می‌کند. در صورت یکسان‌بودن هزینه همه شروع‌ها، مقدار هزینه مقیاس‌بندی‌شده صفر خواهد بود. این ضرایب پیش از تخصیص و فقط برای فعالیت‌های دارای مجموعه شروع غیرتهی محاسبه می‌شوند؛ کاهش ظرفیت، ضرایب مقیاس‌بندی را تغییر نمی‌دهد. این مقیاس‌بندی، مصالحه درون هر فعالیت را بیان می‌کند و معادل کمینه‌سازی مستقیم مجموع هزینه پولی نیست. امتیاز شروع و معیار مشترک ارزیابی برنامه‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f_i(s) = \lambda \, \hat{C}_i(s) + (1-\lambda) \, \hat{D}_i(s) \tag{۱۰}$$

$$J = M \sum_{i\in I} (1 - y_i) + \sum_{i\in I} \sum_{s\in A_i(\tau)} f_i(s) \, x_{i,s}, \qquad M = N + 1 \tag{۱۱}$$

در روابط (۱۰) و (۱۱)، $f_i(s)$ امتیاز شروع فعالیت i، λ وزن هزینه در بازه صفر تا یک و $\lambda - 1$ وزن انحراف زمانی است. J معیار کل برنامه، M جریمه تخصیص‌نیافتن یک فعالیت و N تعداد فعالیت‌ها هستند. با توجه به قرارداشتن امتیاز هر فعالیت بین صفر و یک، انتخاب M=N+1 در کمینه‌سازی دقیق، تکمیل یک فعالیت بیشتر را بر تغییر مجموع امتیازها مقدم می‌کند. این معیار اجازه نمی‌دهد حذف فعالیت صرفاً به دلیل کاهش هزینه امتیاز بهتری ایجاد کند. روش پیشنهادی آن را با تخصیص حریصانه تقریب می‌زند و برای کمینه‌سازی سراسری J تضمین ندارد. وزن هزینه باید پیش از مقایسه تعیین شود و در تمام روش‌ها یکسان بماند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

۳-۴- اولویت‌بندی با حاشیه زمانی

پیش از تخصیص، فرصت باقی‌مانده هر فعالیت برای جابه‌جایی محاسبه می‌شود:

$$h_i(\tau) = d_i - \max\{r_i, \tau\} - m_i \tag{۱۲}$$

در رابطه (۱۲)، $h_i(\tau)$ حاشیه زمانی فعالیت i برحسب تعداد بازه‌ها و d_i مهلت پایان است. این تعریف، برای فعالیت‌هایی که هنوز زمان دسترسی آن‌ها نرسیده است، زودترین شروع مجاز را مبنای محاسبه قرار می‌دهد. در برنامه‌ریزی کل افق، مقدار آن عرض پنجره شروع مجاز، پیش از بررسی ظرفیت، را نشان می‌دهد. حاشیه صفر یعنی فعالیت فقط یک شروع مجاز دارد؛ حاشیه منفی نشان‌دهنده ناسازگاری زمانی است. فعالیت‌ها به ترتیب صعودی حاشیه زمانی بررسی می‌شوند تا فرصت محدود فعالیت‌های کم‌انعطاف زودتر در نظر گرفته شود. در تساوی حاشیه‌ها، مهلت پایان زودتر و سپس بیشترین توان چرخه بالاتر، اولویت دارند؛ شناسه فعالیت، تساوی نهایی را رفع می‌کند. این ترتیب، اجرا را قطعی و قابل‌بازتولید می‌سازد. استفاده از این قاعده تضمین نمی‌کند بیشترین تعداد فعالیت قابل‌اجرا پذیرفته شوند؛ نقش آن، راهنمایی تخصیص با توجه به محدودیت زمانی است.

۳-۵- بررسی ظرفیت در سراسر چرخه

در آغاز، منحنی بار برابر بار پایه قرار می‌گیرد. پس از هر تخصیص، ظرفیت باقی‌مانده برای فعالیت بعدی محاسبه می‌شود:

$$R_t^{(k)} = P_t^{\max} - L_t^{(k-1)}, \quad t \in \Omega \tag{۱۳}$$

در رابطه (۱۳)، $R_t^{(k)}$ ظرفیت باقی‌مانده در بازه t پیش از تخصیص مرحله k، $P_t^{\max}$ سقف توان و $L_t^{(k-1)}$ بار پس از بررسی $k-1$ فعالیت هستند. k شماره مرحله تخصیص است و شاخص گذر زمان واقعی نیست. در مرحله اول، منحنی بار قبلی همان بار پایه است. ظرفیت باقی‌مانده برحسب کیلووات محاسبه می‌شود. شروع‌هایی که تمام چرخه فعالیت را در ظرفیت باقی‌مانده جای می‌دهند، تشکیل مجموعه امکان‌پذیر می‌دهند:

$$F_i^{(k)} = \{s \in A_i(\tau) : p_{i,l} \le R_{s+l}^{(k)} \quad \forall l \in \{0,\dots,m_i - 1\}\} \tag{۱۴}$$

در رابطه (۱۴)، $F_i^{(k)}$ مجموعه شروع‌های امکان‌پذیر فعالیت i در مرحله k و $R_{s+l}^{(k)}$ ظرفیت باقی‌مانده در بازه متناظر هستند. بنابراین، وجود ظرفیت کافی در بازه شروع به‌تنهایی ملاک پذیرش نیست؛ حتی یک بازه دارای کمبود ظرفیت، آن شروع را حذف می‌کند. این بررسی برای وسایلی که توان مراحل آن‌ها متفاوت است اهمیت دارد.

۳-۶- انتخاب شروع و به‌روزرسانی برنامه

از میان شروع‌های امکان‌پذیر، انتخاب نهایی به شکل زیر انجام می‌شود:

$$S_i^* = \underset{s \in F_i^{(k)}}{lex \arg\min} \, (f_i(s), C_i(s), D_i(s), s) \tag{۱۵}$$

در رابطه (۱۵)، عبارت lex arg min انتخاب کمینه با ترتیب تقدم را نشان می‌دهد: ابتدا امتیاز ترکیبی، در صورت تساوی هزینه کمتر، سپس انحراف زمانی کمتر و در نهایت شروع زودتر ترجیح داده می‌شود. اگر مجموعه امکان‌پذیر تهی باشد، این رابطه اجرا نمی‌شود و فعالیت تخصیص‌نیافته ثبت می‌شود. پس از تصمیم برای فعالیت i، منحنی بار به صورت زیر به‌روزرسانی می‌شود:

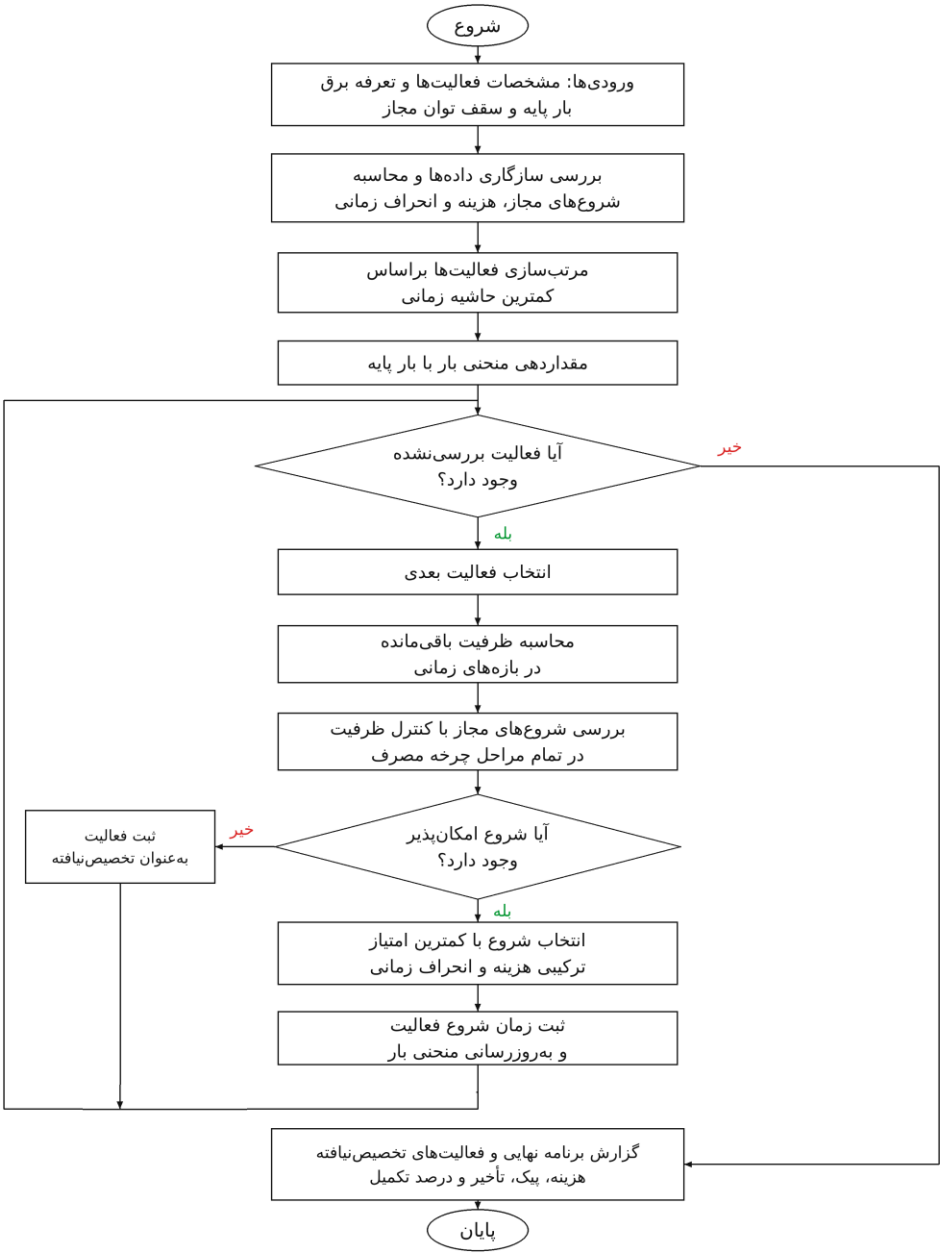
$$L_t^{(k)} = \begin{cases} L_t^{(k-1)} + q_i(t; s_i^*), & F_i^{(k)} \neq \phi \\ L_t^{(k-1)} & F_i^{(k)} = \phi \end{cases} \tag{۱۶}$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

در حالت پذیرش، متغیر تکمیل برابر یک و متغیر شروع متناظر برابر یک قرار می‌گیرد؛ در حالت عدم پذیرش، این متغیرها صفر باقی می‌مانند. ظرفیت با منحنی جدید برای فعالیت بعدی محاسبه می‌شود. این سازوکار امکان‌پذیری برنامه پذیرفته‌شده را حفظ می‌کند. بار اولیه معتبر از سقف عبور نمی‌کند و هر تخصیص فقط زمانی انجام می‌شود که توان فعالیت در همه مراحل، حداکثر برابر ظرفیت باقی‌مانده باشد. در نتیجه، بار پس از تخصیص نیز در همه بازه‌ها محدودیت توان را رعایت می‌کند. این استدلال، امکان‌پذیری برنامه را تضمین می‌کند؛ تضمین بهینگی هزینه یا بیشترین درصد تکمیل از آن به دست نمی‌آید.

۳-۷- مراحل اجرای الگوریتم

شکل (۱) فلوچارت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. ورودی الگوریتم شامل مشخصات فعالیت‌ها، طول بازه، بار پایه، تعرفه، سقف توان و وزن هزینه است. ابتدا سازگاری پنجره‌ها، زمان ترجیحی، طول پروفیل‌ها و بار پایه بررسی می‌شود. سپس شروع‌های مجاز و هزینه و انحراف متناظر محاسبه می‌شوند و ضرایب مقیاس‌بندی ثابت به دست می‌آیند.



شکل (۱): فلوچارت روش پیشنهادی.

Figure(1):Proposed method flowchart

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

فعالیت‌های فاقد شروع مجاز، از مرحله جست‌وجو کنار گذاشته و به‌عنوان تخصیص‌نیافته ثبت می‌شوند. برای سایر فعالیت‌ها، حاشیه زمانی محاسبه و ترتیب بررسی تعیین می‌شود. در حلقه اصلی، برای هر فعالیت، ظرفیت باقی‌مانده از منحنی بار فعلی استخراج می‌شود. تمام شروع‌های مجاز با بررسی کل چرخه آزموده می‌شوند. اگر شروع امکان‌پذیری وجود داشته باشد، الگوریتم کمترین امتیاز ترکیبی را انتخاب و منحنی بار را به‌روزرسانی می‌کند. در غیر این صورت، فعالیت ثبت می‌شود و بررسی فعالیت بعدی ادامه می‌یابد. پس از تخصیص یک فعالیت، تصمیم آن در نسخه حاضر بازنگری نمی‌شود. بنابراین، روش ماهیت حریصانه دارد و ممکن است یک تخصیص اولیه، امکان اجرای فعالیت بعدی را از بین ببرد. خروجی، زمان شروع و پایان فعالیت‌های پذیرفته‌شده، فهرست فعالیت‌های تخصیص‌نیافته و منحنی بار نهایی است. برای فعالیت‌های تخصیص‌نیافته، علت نبود شروع مجاز زمانی یا نبود ظرفیت در برنامه ساخته‌شده تفکیک می‌شود. نبود ظرفیت در این برنامه به معنای ناممکن‌بودن تمام برنامه‌های جایگزین نیست. همچنین، چون زمان‌بندی پروفیل مصرف را تغییر نمی‌دهد، انرژی هر فعالیت پذیرفته‌شده ثابت می‌ماند؛ بهبود اقتصادی از جابه‌جایی زمان مصرف ناشی می‌شود. اگر فعالیتی حذف شود، انرژی کمتر باید همراه با کاهش درصد تکمیل گزارش شود.

مرتب‌سازی فعالیت‌ها دارای پیچیدگی $O(N\ log\ N)$ است. در بررسی مستقیم، آزمون هر شروع فعالیت i، به m_i بررسی ظرفیت نیاز دارد؛ بنابراین، زمان محاسبه کل از مرتبه $O(N\ log\ N\ +\ \Sigma_i|A_i|m_i)$ است. اگر هر فعالیت حداکثر T شروع و حداکثر m_{max} مرحله داشته باشد، کران $O(N\ log\ N\ +\ N\,T\,m_{max})$ به دست می‌آید. با محاسبه امتیازها برای یک فعالیت در هر مرحله، و ذخیره برنامه به صورت فهرست شروع‌ها، حافظه اضافی موردنیاز از مرتبه $O(T\ +\ N)$ است.

۴- آزمایش‌ها و یافته‌ها

برای ارزیابی روش پیشنهادی، مجموعه‌داده REFIT [۳۱] به عنوان منبع داده‌های واقعی مصرف برق در نظر گرفته می‌شود. این مجموعه شامل اندازه‌گیری مصرف کل و مصرف وسایل در ۲۰ خانوار، با فاصله نمونه‌برداری ۸ ثانیه است. چرخه‌های کامل فعالیت وسایل قابل‌انتقال از داده‌ها استخراج می‌شوند و مدت اجرا و پروفیل توان آن‌ها به‌عنوان ورودی زمان‌بندی به کار می‌روند. بار پایه نیز با کسر مصرف فعالیت‌های منتخب از مصرف کل محاسبه می‌شود تا از شمارش دوباره بار جلوگیری شود. زمان شروع ثبت‌شده، به عنوان مرجع ترجیح زمانی در نظر گرفته می‌شود و پنجره‌های مجاز جابه‌جایی، تعرفه برق و سقف توان به صورت سناریوهای مشخص تعریف می‌شوند.

۴-۱- معیارهای ارزیابی

معیارهای ارزیابی شامل هزینه برق، نارضایتی زمانی، درصد صرفه‌جویی و صرفه‌جویی حاشیه‌ای است.

۱- هزینه برق: هزینه کل از رابطه (۷) محاسبه می‌شود و اثر جابه‌جایی مصرف میان بازه‌های تعرفه‌ای را نشان می‌دهد.

۲- شاخص نارضایتی زمانی: خروج فعالیت از بازه ترجیحی کاربر به‌صورت زیر اندازه‌گیری می‌شود:

$$DI = \Delta t \sum_{i=1}^{N}\left[\max(0, a_i - s_i) + \max(0, e_i - b_i)\right] \quad (۱۷)$$

در این رابطه، DI نارضایتی تجمعی برحسب ساعت، N تعداد فعالیت‌ها، s_i شروع و $e_i = s_i + m_i - 1$ آخرین بازه اجرای فعالیت هستند. m_i مدت اجرا برحسب تعداد بازه‌ها، a_i و b_i ابتدا و انتهای بازه ترجیحی و Δt طول بازه است.

۳- درصد صرفه‌جویی هزینه:

$$SR = \frac{C_{ref} - C_{sch}}{C_{ref}} \times 100 \quad (۱۸)$$

در این رابطه، SR درصد صرفه‌جویی، $C_{ref} > 0$ هزینه برنامه مرجع و C_{sch} هزینه برنامه زمان‌بندی‌شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

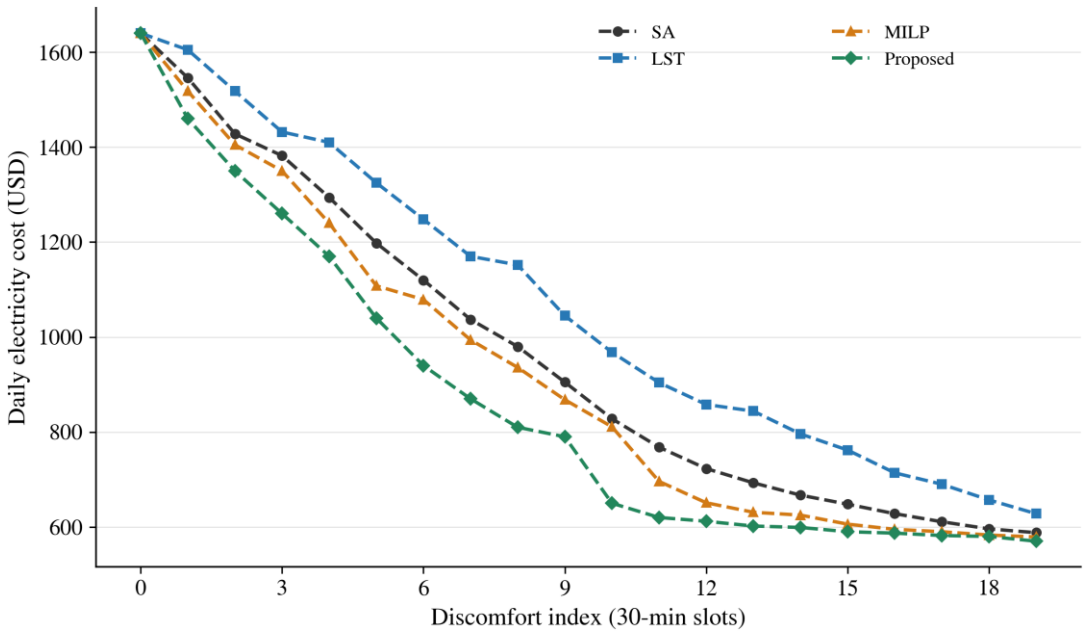
۴- صرفه‌جویی حاشیه‌ای: میزان کاهش هزینه به ازای افزایش نارضایتی میان دو سناریوی متوالی محاسبه می‌شود:

$$MS_j = \frac{C_{j-1} - C_j}{DI_{j-1} - DI_j} \quad (۱۹)$$

در این رابطه، MS_j صرفه‌جویی حاشیه‌ای، C_j هزینه و DI_j نارضایتی سناریوی j هستند. علامت مثبت، کاهش هزینه را نشان می‌دهد.

۴-۱- نتایج

شکل (۲) تغییرات هزینه روزانه برق را در سطوح مختلف شاخص نارضایتی برای روش پیشنهادی و سه روش LST، SA و MILP نشان می‌دهد. شاخص نارضایتی برحسب مجموع بازه‌های ۳۰ دقیقه‌ای انحراف از پنجره ترجیحی اندازه‌گیری شده است. در حالت نارضایتی صفر، هزینه هر چهار روش تقریباً برابر با ۱۶۴۰ دلار است. با افزایش نارضایتی مجاز، هزینه در تمامی روش‌ها کاهش می‌یابد؛ روندی که با افزایش امکان انتقال فعالیت وسایل به ساعات دارای تعرفه کمتر سازگار است. شدت کاهش هزینه و محل افت‌های عمده در روش‌ها یکسان نیست. روش پیشنهادی در سطوح مثبت نارضایتی، پایین‌ترین هزینه را در مقایسه ارائه شده دارد، درحالی که LST بیشترین هزینه را نشان می‌دهد. برای نمونه، در شاخص نارضایتی ۱۰، هزینه روش پیشنهادی حدود ۶۵۰ دلار است، درحالی که هزینه‌های MILP، SA و LST به ترتیب ۸۱۰، ۸۳۰ و ۹۷۰ دلار هستند. بنابراین، تفاوت عملکرد روش‌ها صرفاً ناشی از پذیرش نارضایتی بیشتر نیست و در سطح یکسان نارضایتی نیز مشاهده می‌شود. روند روش پیشنهادی نشان می‌دهد که بخش عمده کاهش هزینه تا حوالی شاخص نارضایتی ۱۱ حاصل می‌شود و پس از آن، کاهش هزینه محدودتر است. هزینه این روش از حدود ۶۲۰ دلار در شاخص ۱۱ به حدود ۵۷۰ دلار در انتهای دامنه می‌رسد؛ در نتیجه، افزایش بیشتر نارضایتی در این محدوده، منفعت اقتصادی کمتری ایجاد می‌کند. همچنین، با افزایش شاخص نارضایتی، فاصله هزینه روش پیشنهادی با MILP و SA کاهش می‌یابد و منحنی‌ها به یکدیگر نزدیک می‌شوند. این الگو نشان می‌دهد که مزیت هزینه‌ای روش پیشنهادی در محدوده نارضایتی کم تا متوسط برجسته‌تر است. ازاین رو، محدوده نزدیک به شاخص ۱۱ می‌تواند برای بررسی مصالحه میان هزینه و آسایش کاربر مورد توجه قرار گیرد؛ انتخاب نهایی این سطح به میزان نارضایتی قابل‌پذیرش برای کاربر بستگی دارد.

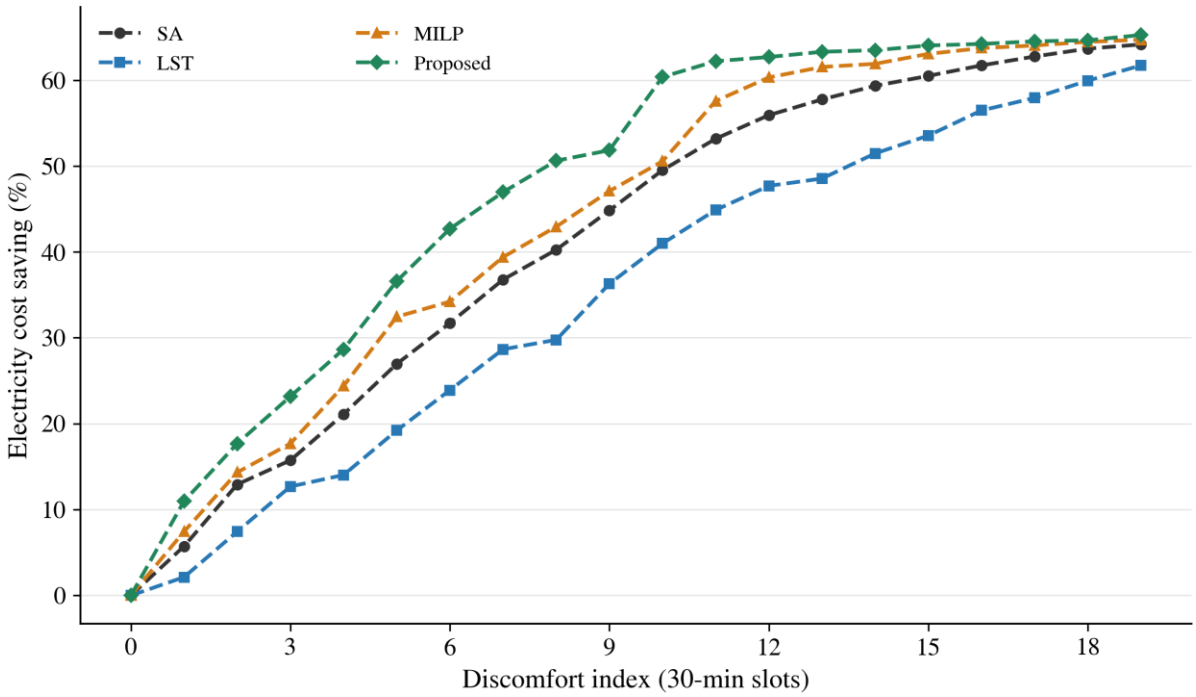


شکل (۲): مقایسه هزینه روزانه برق (دلار) در سطوح مختلف شاخص نارضایتی، برحسب بازه‌های ۳۰ دقیقه‌ای

Figure(2): Comparison of daily electricity costs (USD) at different levels of the dissatisfaction index, based on 30-minute intervals

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

شکل (۳) درصد صرفه‌جویی در هزینه برق را نسبت به حالت مبنا با نارضایتی صفر نشان می‌دهد. با افزایش شاخص نارضایتی، صرفه‌جویی در هر چهار روش افزایش می‌یابد، اما میزان این افزایش متفاوت است. روند منحنی روش پیشنهادی نشان می‌دهد که بخش عمده صرفه‌جویی تا حوالی شاخص نارضایتی ۱۱ حاصل می‌شود؛ در این نقطه، کاهش هزینه به حدود ۶۲ درصد می‌رسد. پس از آن، منحنی شیب کمتری دارد و صرفه‌جویی در انتهای دامنه به حدود ۶۵ درصد افزایش می‌یابد. در نتیجه، افزایش نارضایتی از ۱۱ تا انتهای دامنه، تنها حدود سه واحد درصد صرفه‌جویی بیشتر ایجاد می‌کند. همچنین، در سطوح بالاتر نارضایتی، فاصله روش پیشنهادی با MILP و SA کاهش می‌یابد، در حالی که LST همچنان صرفه‌جویی کمتری دارد. این الگو بیانگر برجسته‌تر بودن مزیت روش پیشنهادی در محدوده نارضایتی کم تا متوسط است.



شکل (۳): مقایسه درصد صرفه‌جویی در هزینه برق نسبت به حالت مبنا با نارضایتی صفر در سطوح مختلف شاخص نارضایتی

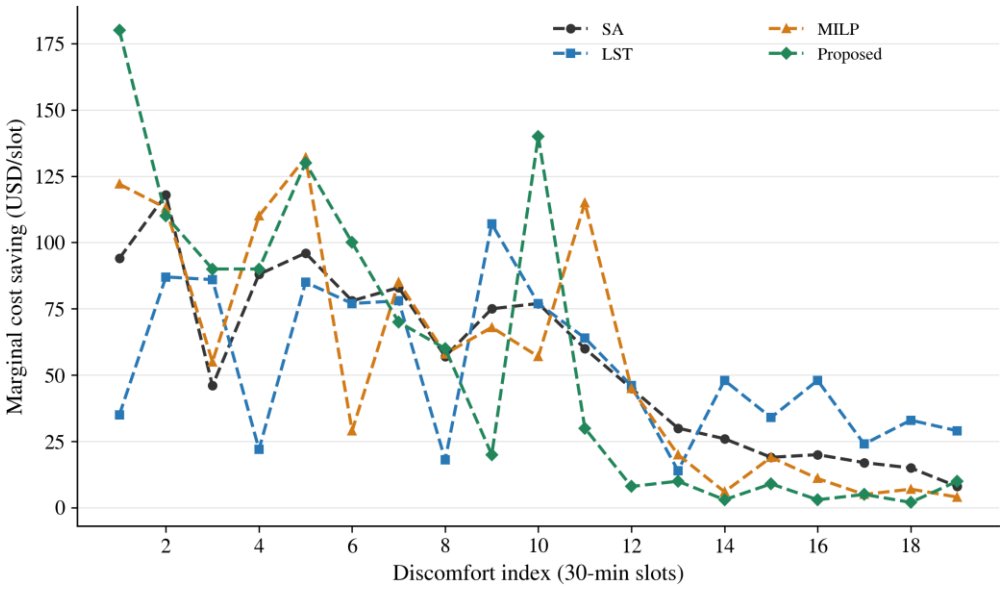
Figure(3): Comparison of electricity cost savings relative to the baseline—with zero dissatisfaction—across various levels of the dissatisfaction index

اهمیت شکل (۴) در مشخص‌کردن منفعت اقتصادی هر افزایش در نارضایتی است. هر نقطه این نمودار، کاهش هزینه نسبت به سناریوی قبلی را به ازای تغییر شاخص نارضایتی نشان می‌دهد. در منحنی روش پیشنهادی، افزایش شاخص از صفر به یک، حدود ۱۸۰ دلار کاهش هزینه ایجاد می‌کند. دو قله دیگر نیز در شاخص‌های ۵ و ۱۰، با مقادیر تقریبی ۱۳۰ و ۱۴۰ دلار به‌ازای هر واحد نارضایتی، مشاهده می‌شوند. وجود این قله‌ها در کنار افت‌های میانی نشان می‌دهد که منفعت اقتصادی افزایش نارضایتی یکنواخت نیست. این رفتار با ماهیت گسسته زمان‌بندی وسایل سازگار است؛ افزایش محدود انعطاف‌پذیری ممکن است در برخی مراحل تغییر اندکی ایجاد کند، اما در مرحله‌ای دیگر امکان انتقال یک چرخه کامل فعالیت به ساعات ارزان‌تر را فراهم سازد.

افت صرفه‌جویی حاشیه‌ای روش پیشنهادی از حدود ۱۴۰ دلار در شاخص ۱۰ به حدود ۳۰ دلار در شاخص ۱۱، مرز مهمی در تفسیر این منحنی است. از شاخص ۱۲ به بعد، مقادیر این روش عمدتاً کمتر از ۱۵ دلار به‌ازای هر واحد نارضایتی‌اند؛ بنابراین، افزایش بیشتر نارضایتی در این محدوده منفعت اقتصادی محدودی دارد. زمان وقوع افت‌های عمده در روش‌های دیگر متفاوت است؛ برای مثال، MILP در شاخص ۱۱ قله‌ای نزدیک به ۱۱۵ دلار دارد و LST در شاخص‌های ۱۴ و ۱۶ همچنان مقادیری

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

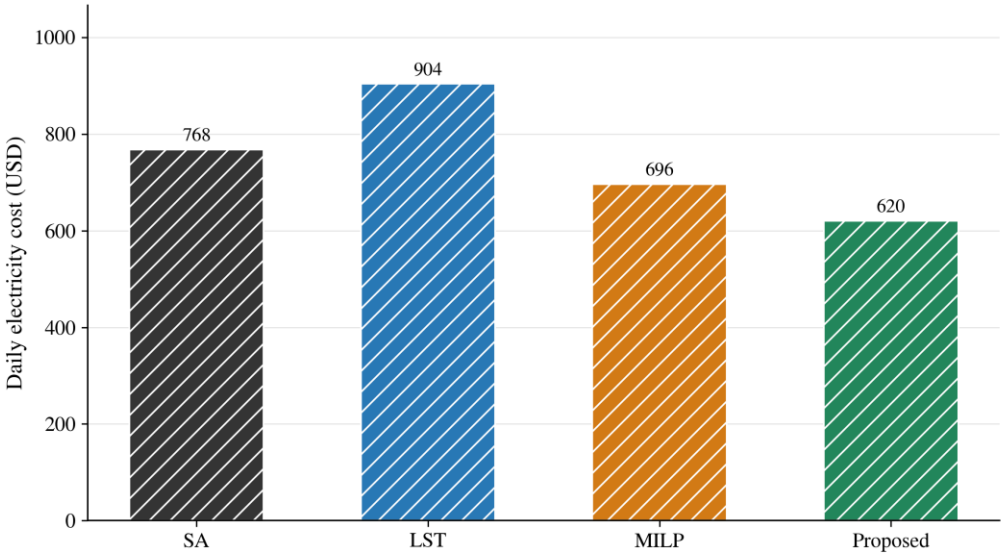
نزدیک به ۴۸ دلار نشان می‌دهد. این مقادیر باید همراه با هزینه کل در شکل (۲) تفسیر شوند، زیرا صرفه‌جویی حاشیه‌ای بیشتر در یک مرحله، به تنهایی به معنای هزینه نهایی کمتر نیست.



شکل (۴): مقایسه صرفه‌جویی حاشیه‌ای در هزینه برق، برحسب دلار به ازای افزایش یک واحد شاخص نارضایتی (یک بازه ۳۰ دقیقه‌ای)

Figure(4): Comparison of marginal electricity cost savings, in dollars, per unit increase in the dissatisfaction index (a 30-minute interval)

با تثبیت شاخص نارضایتی در مقدار ۱۱، شکل (۵) امکان مقایسه مستقیم هزینه روش‌ها را در سطح یکسانی از نارضایتی فراهم می‌کند. هزینه روش پیشنهادی ۶۲۰ دلار است و در مقایسه با مقادیر گزارش‌شده برای MILP، SA و LST، به ترتیب ۷۶، ۱۴۸ و ۲۸۴ دلار کمتر است. این اختلاف‌ها معادل کاهش نسبی هزینه به میزان ۱۰٫۹۲، ۱۹٫۲۷ و ۳۱٫۴۲ درصد نسبت به هر روش هستند. بیشترین فاصله هزینه‌ای با LST مشاهده می‌شود و MILP نزدیک‌ترین مقدار را به روش پیشنهادی دارد. بنابراین، در این سناریو، تفاوت هزینه‌ها با افزایش نارضایتی روش پیشنهادی توضیح داده نمی‌شود، زیرا شاخص نارضایتی برای همه روش‌ها یکسان است. هزینه ۶۲۰ دلاری روش پیشنهادی همچنین معادل ۶۲٫۲۰ درصد صرفه‌جویی نسبت به هزینه مبنای ۱۶۴۰ دلار است. جدول (۲)، هزینه و معیارهای مرتبط را در همین سناریو کنار یکدیگر قرار می‌دهد.



شکل (۵): مقایسه هزینه روزانه برق (دلار) در سناریوی شاخص نارضایتی ۱۱.

Figure(5): Comparison of daily electricity costs (USD) under the Discontent Index 11 scenario

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

Table(2): Comparison Table of Methods for Dissatisfaction Index Scenario 11

جدول (۲): جدول مقایسه‌ای روش‌ها در سناریوی شاخص نارضایتی ۱۱.

روش	شاخص نارضایتی (بازه ۳۰ دقیقه‌ای)	هزینه روزانه (USD)	صرفه‌جویی نسبت به مبنا (٪)	صرفه‌جویی حاشیه‌ای (USD/slot)
LST	۱۱	۹۰۴	۴۴٫۸۸	۶۴
SA	۱۱	۷۶۸	۵۳٫۱۷	۶۰
MILP	۱۱	۶۹۶	۵۷٫۵۶	۱۱۵
روش پیشنهادی	**۱۱**	**۶۲۰**	**۶۲٫۲۰**	**۳۰**

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، زمان‌بندی بارهای انعطاف‌پذیر خانگی با تمرکز بر کاهش هزینه برق و کنترل انحراف از زمان‌های ترجیحی بررسی شد. روش پیشنهادی با ترکیب اولویت‌بندی بر اساس زمان آزاد باقی‌مانده و بررسی ظرفیت در تمام چرخه فعالیت، تصمیم‌گیری درباره زمان شروع وسایل را در چارچوب قیود اجرایی انجام می‌دهد. در مقایسه عددی ارائه‌شده، این روش در سطوح مثبت شاخص نارضایتی، هزینه کمتری از سه روش مقایسه‌ای دارد. در سناریوی نارضایتی ۱۱، هزینه روش پیشنهادی ۶۲۰ دلار است، درحالی‌که هزینه‌های LST، SA و MILP به‌ترتیب ۹۰۴، ۷۶۸ و ۶۹۶ دلار گزارش شده‌اند. یکسان‌بودن شاخص نارضایتی در این سناریو، امکان مقایسه هزینه روش‌ها را در سطح مشترکی از آسایش کاربر فراهم می‌کند. تحلیل منحنی‌ها نشان داد که افزایش انعطاف‌پذیری همواره منفعت اقتصادی یکسانی ایجاد نمی‌کند. بخش عمده صرفه‌جویی روش پیشنهادی تا حوالی شاخص نارضایتی ۱۱ حاصل می‌شود و افزایش این شاخص تا انتهای دامنه، تنها حدود سه واحد درصد صرفه‌جویی بیشتر فراهم می‌کند. بنابراین، انتخاب برنامه زمان‌بندی باید علاوه بر هزینه نهایی، منفعت حاصل از هر افزایش در نارضایتی را نیز لحاظ کند. دامنه این مقایسه به معیارهای هزینه و نارضایتی محدود است؛ ارزیابی زمان محاسبه، درصد تکمیل فعالیت‌ها و پیک بار، همراه با گزارش وضعیت حل و شکاف بهینگی MILP، برای قضاوت جامع درباره عملکرد روش‌ها ضروری است. در کارهای آینده، بررسی شرایط کمبود ظرفیت، تغییر تعرفه و ورود تدریجی فعالیت‌ها می‌تواند پایداری عملکرد روش پیشنهادی را در شرایط متنوع‌تر روشن کند.

سپاسگزاری

از کلیه اعضای محترم هیات علمی گروه برق و حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول که در نشر و چاپ این نشریه کمک می‌کنند صمیمانه سپاسگزاریم.

References

مراجع

[1] Han, B., Zahraoui, Y., Mubin, M., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M., & Stojcevski, A. (2023). Home energy management systems: A review of the concept, architecture, and scheduling strategies. Ieee Access, 11, 19999-20025.

[2] Manembu, P. D., Kewo, A., Bramstoft, R., & Nielsen, P. S. (2023). A systematicity review on residential electricity load-shifting at the appliance level. Energies, 16(23), 7828.

[3] Mota, B., Faria, P., & Vale, Z. (2024). Energy cost optimization through load shifting in a photovoltaic energy-sharing household community. Renewable Energy, 221, 119812.

[4] Duman, A. C., Gönül, Ö., Erden, H. S., & Güler, Ö. (2023). Survey-and simulation-based analysis of residential demand response: Appliance use behavior, electricity tariffs, home energy management systems. Sustainable Cities and Society, 96, 104628.

[5] Kaiser, K., Kreft, M., & Hug, G. (2026). Peak reduction via time-variable tariffs and automated load control: Results from a Swiss pilot study. Applied Energy, 412, 127665.

[6] Shewale, A., Mokhade, A., Lipare, A., & Bokde, N. D. (2024). Efficient techniques for residential appliances scheduling in smart homes for energy management using multiple knapsack problem. Arabian Journal for Science and Engineering, 49(3), 3793-3813.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

[7] Panda, S., Samanta, I. S., Rout, P. K., Sahu, B. K., Bajaj, M., Blazek, V., ... & Misak, S. (2024). Priority-based scheduling in residential energy management systems integrated with renewable sources using adaptive Salp swarm algorithm. Results in Engineering, 23, 102643.

[8] Malakhatka, E., Hagejärd, S., Mazidi, M., Corcoran, K., Röderer, K., & Wallbaum, H. (2025). Optimal time recommendation model for home appliances: HSB living lab+ dishwasher study. Energy Efficiency, 18(1), 3.

[9] Barsanti, M., Schwarz, J. S., Ghali, F., Yilmaz, S., Lehnhoff, S., & Binder, C. R. (2025). Load-shifting for cost, carbon, and grid benefits: A model-driven adaptive survey with German and Swiss households. Energy Research & Social Science, 121, 103931.

[10] Kamyab, G. R. (2025). Scheduling of Home Energy Management Systems for Price-Based Demand Response and End-Users Discomfort Reduction. Serbian Journal of Electrical Engineering, 22(1), 17.

[11] Faia, R., Faria, P., & Vale, Z. (2025). Optimal energy management with discomfort calculation in residential buildings considering load shifting and home battery storage system. Sustainable Energy, Grids and Networks, 41, 101624.

[12] Vibhute, S., Kowli, A., & Kulkarni, A. A. (2025). Improved load approximation models and tractable solution schemes for home energy management. Energy, 137765.

[13] Lin, S. M., Hsiao, Y. T., Lu, C. T., & Chou, C. J. (2026). Numerical behavior-aware scheduling framework for residential appliance control under time-of-use tariffs. Journal of Building Performance Simulation, 19(3), 403-419.

[14] Zaytoun, A. M., Maksoud, I. A. A., & Rabia, S. I. (2026). Multi-objective home energy management system with realistic load classification and multi-source uncertainty modeling: A robust optimization approach. Journal of Process Control, 162, 103722.

[15] Alahyari, A., & Jooshaki, M. (2023). Fast energy management approach for the aggregated residential load and storage under uncertainty. Journal of Energy Storage, 62, 106848.

[16] Yahia, Z., & Pradhan, A. (2020). Multi-objective optimization of household appliance scheduling problem considering consumer preference and peak load reduction. Sustainable Cities and Society, 55, 102058.

[17] Pamulapati, T., Mallipeddi, R., & Lee, M. (2020). Multi-objective home appliance scheduling with implicit and interactive user satisfaction modelling. Applied Energy, 267, 114690.

[18] Apaydin-Özkan, H. (2021). An appliance scheduling system for residential energy management. Sensors, 21(9), 3287.

[19] Sharda, S., Sharma, K., & Singh, M. (2021). A real-time automated scheduling algorithm with PV integration for smart home prosumers. Journal of Building Engineering, 44, 102828.

[20] Cerna, F. V., & Contreras, J. (2021). A MILP model to relieve the occurrence of new demand peaks by improving the load factor in smart homes. Sustainable Cities and Society, 71, 102969.

[21] Chreim, B., Esseghir, M., & Merghem-Boulahia, L. (2022). LOSISH—LOad Scheduling In Smart Homes based on demand response: Application to smart grids. Applied Energy, 323, 119606.

[22] Mota, B., Faria, P., & Vale, Z. (2022). Residential load shifting in demand response events for bill reduction using a genetic algorithm. Energy, 260, 124978.

[23] Li, S., Cao, D., Huang, Q., Zhang, Z., Chen, Z., Blaabjerg, F., & Hu, W. (2022). A deep reinforcement learning-based approach for the residential appliances scheduling. Energy Reports, 8, 1034-1042.

[24] Goyal, G. R., & Vadhera, S. (2023). Development of two stage optimization-based demand response technique for smart homes under real time pricing. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 31(2), 263-281.

[25] Jasim, B. H., AL-Aaragee, A. M. J., Alawsi, A. A. A., & Dakhil, A. M. (2023). A heuristic optimization approach for the scheduling home appliances. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 12(3), 1256-1266.

[26] Fan, X. M., Li, X. H., Ding, Y. M., He, J., & Zhao, M. (2023). Demand response scheduling algorithm for smart residential communities considering heterogeneous energy consumption. Energy and Buildings, 279, 112691.

[27] Xiong, B., Wei, F., Wang, Y., Xia, K., Su, F., Fang, Y., ... & Wei, Z. (2024). Hybrid robust-stochastic optimal scheduling for multi-objective home energy management with the consideration of uncertainties. Energy, 290, 130047.

[28] Taboh, S., Méndez-Díaz, I., & Zabala, P. (2024). Heuristics for home appliances scheduling problems with energy consumption bounds. Sustainable Energy, Grids and Networks, 39, 101511.

[29] Pan, T., Zhu, Z., Luo, H., Li, C., Jin, X., Meng, Z., & Cai, X. (2024). Home energy management strategy to schedule multiple types of loads and energy storage device with consideration of user comfort: a deep reinforcement learning based approach. Frontiers in Thermal Engineering, 4, 1391602.

[30] van der Linden, K., Romero, N., & de Weerdt, M. M. (2021). Benchmarking Flexible Electric Loads Scheduling Algorithms. Energies, 14(5), 1269.

[31] Murray, D., Stankovic, L., & Stankovic, V. (2016). REFIT: Electrical load measurements (cleaned). University of Strathclyde, PURE.

زیرنویس‌ها

1. Multiple knapsacks with serial implementation
2. Multiple knapsacks with parallel implementation
3. Appliance Scheduling-based Residential Energy Management System

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 1- Spring 2026

4. Brute-Force Closest Pair
5. Particle Swarm Optimization
6. Cuckoo Search
7. Least Slack Time
8. Programmable Heuristic-based Energy Management Controller
9. Deep Deterministic Policy Gradient
10. Mixed-Integer Linear Programming
11. Simulated Annealing

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-10-21]