

A tri-level optimization model for utilizing the potential of IoT-based subscribers and electric vehicles in energy and ancillary services markets

Leyla Karami¹, *Ph.D. student*, Amir Ahmarinejad¹, *Associate Professor*, Mahmood Hosseini Aliabadi¹, *Assistant professor*, Arash Dana¹, *Assistant professor*

¹ Department of Electrical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract:

This paper presents a tri-level model for the simultaneous management of energy and ancillary services markets between transmission and distribution networks integrated with renewable energy sources, smart homes based on the Internet of Things, and electric vehicles. In the first level of the proposed model, smart homes plan their participation in the energy and regulation markets and send it to the distribution network operator. In the second level, the operators of the distribution networks plan their area according to the programs received from the smart homes and determine their strategy for participation in the energy, reservation and adjustment markets. In the third level, the strategy of distribution networks is sent to the operator of the transmission system so that the final planning of the energy, reservation and adjustment markets can be done according to them. The proposed model is formulated as a mixed integer linear programming problem and solved by GUROBI solver in GAMS. The implementation of the proposed model showed that this model was able to significantly use the potential of subscribers based on the Internet of Things, electric vehicles, storage systems and demand response programs to improve the technical aspects of transmission and distribution networks as well as to improve the economic aspects of energy markets and ancillary services.

Keywords: Electrical transmission and distribution networks, Optimization of energy and ancillary services markets, Smart homes, Electric vehicles, Renewable energy resources.

Received: 29 June 2023

Revised: 11 September 2023

Accepted: 30 September 2023

Corresponding Author: Dr. Amir Ahmarinejad, a.ahmarinejad@iauctb.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2023.1990126.1079>



یک مدل بهینه‌سازی سه سطحی برای استفاده از پتانسیل مشترکین مبتنی بر اینترنت اشیا و خودروهای الکتریکی در بازارهای انرژی و خدمات جانبی

لیلا کریمی^۱، دانشجوی دکتری، امیر احمدی نژاد^۱، دانشیار، محمود حسینی علی آبادی^۱، استادیار، آرشدانا^۱، استادیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده: این مقاله یک مدل سه سطحی برای مدیریت همزمان بازارهای انرژی و خدمات جانبی میان شبکه‌های انتقال و توزیع یکپارچه شده با منابع انرژی تجدیدپذیر، خانه‌های هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا و خودروهای الکتریکی ارائه می‌دهد. در سطح اول مدل پیشنهادی، خانه‌های هوشمند برنامه‌ریزی مشارکت خود در بازارهای انرژی و تنظیم را انجام داده و برای بهره‌بردار شبکه توزیع ارسال می‌کنند. در سطح دوم، بهره‌برداران شبکه‌های توزیع برنامه‌ریزی ناحیه خود را با توجه به برنامه‌های دریافتی از خانه‌های هوشمند انجام داده و استراتژی خود برای مشارکت در بازارهای انرژی، رزرو و تنظیم تعیین می‌کنند. در سطح سوم، استراتژی شبکه‌های توزیع به بهره‌بردار سیستم انتقال ارسال شده تا برنامه‌ریزی نهایی بازارهای انرژی، رزرو و تنظیم با توجه به آن‌ها انجام شود. مدل پیشنهادی در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح فرموله شده و توسط حل‌کننده GUROBI در نرم‌افزار GAMS حل می‌شود. پیاده‌سازی مدل پیشنهادی نشان داد که این مدل توانسته به طور قابل توجهی از پتانسیل بالقوه مشترکین مبتنی بر اینترنت اشیا، خودروهای الکتریکی، سیستم‌های ذخیره‌ساز و برنامه‌های پاسخگویی تقاضا برای ارتقای جنبه‌های فنی شبکه‌های انتقال و توزیع و همچنین ارتقای جنبه‌های اقتصادی بازارهای انرژی و خدمات جانبی استفاده کند.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های انتقال و توزیع الکتریکی؛ بهینه‌سازی بازارهای انرژی و خدمات جانبی؛ خانه‌های هوشمند؛ خودروهای الکتریکی؛ منابع انرژی تجدیدپذیر.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۴

نویسنده‌ی مسئول: دکتر امیر احمدی نژاد، a.ahmarinejad@iauctb.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2023.1990126.1079>

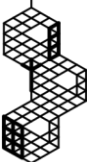




۱- مقدمه

در سالیان اخیر و پیرو سیاست‌های کربن‌زدایی، نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر و خودروهای الکتریکی^۱ در سیستم‌های قدرت افزایش چشمگیری داشته است. این منابع علی‌رغم مزیت‌های زیست‌محیطی و اقتصادی فراوان عدم قطعیت‌های برنامه‌ریزی را افزایش داده و نیاز به سرویس‌های انعطاف‌پذیری بیشتر برای متعادل کردن تولید و مصرف را در سیستم‌های توزیع مدرن ضروری کرده‌اند [۱]. لازم به ذکر می‌باشد که انعطاف‌پذیری، توانایی سیستم برای پوشش نوسانات تولید و مصرف در زمان حقیقی می‌باشد. در سیستم‌های توزیع مدرن تأمین این انعطاف چالش برانگیزتر می‌باشد زیرا از یک سو افزایش نفوذ منابع با رفتار نایقین همچون منابع انرژی تجدیدپذیر و خودروهای الکتریکی نوسانات تولید و مصرف را افزایش داده و از سوی دیگر ظرفیت نیروگاه‌های سوخت فسیلی بزرگ کاهش یافته است [۲]. تجهیزات ذخیره‌ساز و برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا دو گزینه در دسترس در سیستم‌های توزیع مدرن برای تأمین انعطاف مورد نیاز سیستم می‌باشند [۳]. از سوی دیگر، افزایش مشترکین هوشمند در سیستم‌های توزیع مدرن اجرای برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا^۲ (DSM) را آسان کرده از آنجایی که این مشترکین قادر به ارتباط زمان حقیقی با بهره‌بردار سیستم می‌باشند [۴]. علاوه، پیشرفت تکنولوژی‌های خودرو-به-زیرساخت^۳ (V2I) نیز اجرای برنامه‌های تشویقی با هدف اصلاح رفتار کاربران خودروهای الکتریکی را تسهیل کرده است [۵]. به طور کلی یکی از چالش‌های پژوهشگران در سالیان اخیر بهره‌گیری از پتانسیل بارهای منعطف قرار گرفته در سطح توزیع برای ارتقای شاخص‌های فنی و اقتصادی سیستم در سطح انتقال می‌باشد.

در طول دو دهه اخیر تلاش‌های بسیاری با هدف ارتقای فعل و انفعالات میان سیستم‌های انتقال و توزیع انجام شده‌اند. در این زمینه، مرجع [۶] یک مدل دو سطحی برای تسویه بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری^۴ معرفی شده که در آن برنامه‌ریزی شبکه‌های انتقال و توزیع در یک چارچوب متمرکز انجام شده‌اند. در مرحله اول بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری سیستم انتقال برگزار شده در حالی که در سطح دوم بازارهای سیستم توزیع برگزار شده‌اند. به منظور تبدیل مدل دو مرحله‌ای غیر خطی به یک مدل تک مرحله‌ای خطی از روش KKT استفاده شده و نتایج نشان می‌دهند که هماهنگ کردن ارائه‌دهندگان سرویس‌های انعطاف‌پذیری در هر دو سطح انتقال و توزیع منجر به کاهش قیمت حاشیه‌ای محلی^۵ مرتبط به سرویس انعطاف‌پذیری می‌شود. علاوه بر این نتایج این مطالعه نشان‌دهنده تأثیرپذیری منحنی تقاضای سیستم‌های توزیع از قیمت حاشیه‌ای محلی نقاط کوپلینگ می‌باشد. در [۷] به منظور برنامه‌ریزی بازارهای انرژی و رزرو چرخان^۶ در شبکه‌های انتقال و توزیع یک چارچوب غیرمتمرکز معرفی شده که در آن برنامه‌ریزی با حداقل اشتراک‌گذاری داده‌ها^۷ انجام می‌شود. چارچوب پیشنهادی به شکل برنامه‌نویسی مخروطی مرتبه دوم^۸ (SOCP) فرموله شده و بر روی یک شبکه انتقال ۲۴ شینه متصل به چندین سیستم توزیع پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که این چارچوب نه تنها حریم خصوصی اپراتورهای مختلف را ایمن کرده بلکه هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش داده است. در [۸] یک چارچوب غیرمتمرکز برای برگزاری بازارهای انرژی و تعادل میان شبکه‌های انتقال و توزیع هماهنگ ارائه شده است. در مدل پیشنهادی منابع انرژی توزیع شده قرار گرفته در شبکه‌های توزیع قادر به مشارکت در هر دو بازار انرژی و متعادل می‌باشند. نتایج شبیه‌سازی آشکار می‌کنند که استراتژی پیشنهادی با بهره‌گیری از واحدهای منعطف قرار گرفته در سطح توزیع تعادل شبکه انتقال را بهبود داده است. نویسندگان در [۹]، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تقاضا یک مدل دو مرحله‌ای برای مدیریت بازارهای روز بعد شبکه‌های انتقال و توزیع معرفی کرده‌اند. در مرحله اول بازار انرژی سیستم‌های توزیع تسویه شده در حالی که در سطح دوم بازارهای انرژی و رزرو سیستم انتقال تسویه می‌شود. مدل دو مرحله‌ای غیر خطی اولیه با استفاده از کیوود (KKT)^۹ به یک مدل تک سطحی خطی تبدیل شده و نتایج شبیه‌سازی منعکس‌کننده تأثیر استراتژی پیشنهادی بر کاهش هزینه‌های سیستم‌های توزیع می‌باشد. در [۱۰] نویسندگان نشان داده‌اند که خودروهای الکتریکی یک منبع مفید برای ارائه سرویس‌های خدمات جانبی^{۱۰} به شبکه می‌باشند. در این تحقیق نشان داده شده که استخراج انعطاف خودروهای الکتریکی مستلزم هماهنگی میان بهره‌برداران سیستم‌های انتقال و توزیع می‌باشد. در [۱۱] یک مدل جدید برای برنامه‌ریزی غیر متمرکز شبکه‌های انتقال و توزیع ارائه شده است. دو برنامه پخش بار AC و DC به ترتیب در شبکه‌های انتقال و توزیع اجرا شده و مسئله به شکل خطی مدل شده است. نتایج شبیه‌سازی سرعت و دقت مدل پیشنهادی را تأیید می‌کنند. نویسندگان در [۱۲] پنج مدل مختلف برای خرید سرویس انعطاف در شبکه‌های انتقال و توزیع ارائه داده‌اند. در این مطالعه به منظور جلوگیری از به اشتراک‌گذاری از الگوریتم (ADMM)^{۱۱} استفاده شده و مدل نهایی به فرم دو سطحی فرموله شده است. مقایسه بازارهای پیشنهادی در این تحقیق نشان می‌دهد که ایجاد یک



بازار مشترک میان شبکه‌های انتقال و توزیع منجر به دستیابی به نتایج بسیار بهینه‌تری شده جایی که مقدار زیادی از انعطاف سیستم انتقال توسط منابع درون سیستم توزیع تأمین می‌شود. در [۱۳] یک مدل جامع برای ایجاد هماهنگی میان شبکه انتقال، شبکه توزیع و مشترکین نهایی^{۱۲} ارائه شده است. هدف مدل پیشنهادی از ایجاد این هماهنگی کاهش تراکم^{۱۳} سیستم در دوره پیک می‌باشد. این مدل بر روی یک مورد مطالعاتی واقعی در سوئد پیاده‌سازی شده و نتایج نشان می‌دهند که استفاده از انعطاف‌پذیری مشترکین نهایی واقع در سیستم توزیع نه تنها امنیت بهره‌برداری را ارتقاء داده بلکه هزینه تراکم در دوره پیک را کاهش می‌دهد.

پژوهش‌های متعددی اثبات کرده‌اند که برنامه‌های پاسخگویی تقاضا^{۱۴} (DRP) و سیستم‌های ذخیره‌ساز می‌توانند انعطاف‌پذیری بهره‌برداری را به طور مؤثری افزایش دهند [۱۴]. در این زمینه، نویسندگان در [۱۵] نشان داده‌اند که سیستم‌های انرژی محلی که مجهز به واحدهای تولیدی و سیستم‌های ذخیره‌ساز می‌باشند می‌توانند به طور قابل توجهی انعطاف بهره‌برداری را تحت هر دو شرایط عادی و اضطراری افزایش دهند. در این مطالعه یک آنالیز دقیق بر روی تأثیر سیستم‌های ذخیره‌ساز و برنامه‌های پاسخگویی تقاضا بر روی بهره‌برداری شبکه انجام شده و نتایج نشان می‌دهند که عملکرد هماهنگ آن‌ها منجر به ارتقای چشمگیر انعطاف بهره‌برداری و کاهش هزینه‌ها می‌شود. در [۱۶] نویسندگان یک استراتژی جدید برای تأمین انعطاف ریزشکده‌ها از طریق اجرای برنامه‌های پاسخگویی تقاضا ارائه داده‌اند. در این پژوهش مشترکین خانگی با مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا بخش قابل توجهی از انعطاف ریزشکده را تأمین کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که علی‌رغم پرداخت پاداش مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا به مصرف‌کنندگان، هزینه‌های مدیریت انعطاف سیستم حدود ۲۱٪ کاهش یافته‌اند. در [۱۷] یک استراتژی جدید برای برنامه‌ریزی سیستم ارائه شده که در آن از طریق اجرای برنامه‌های پاسخگویی تقاضا انعطاف محلی برای سیستم فراهم می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که این انعطاف منجر به کاهش چشمگیر تراکم شبکه در هر دو شرایط عادی و اضطراری می‌شود. در [۱۸] یک مدل شانس مقید برای مدیریت تراکم و فرکانس سیستم‌های انتقال تحت نفوذ بالای مزارع بادی ارائه شده است. در این مطالعه یک الگوریتم فیلترینگ معرفی شده که از طریق آن قیود شانس تنها بر روی خطوط حساس اعمال شده و متعاقباً حجم محاسبات را کاهش می‌دهد. سیستم‌های ذخیره‌ساز بزرگ در کنار مزارع بادی نصب شده و نتایج نشان می‌دهند که حضور این سیستم‌ها منجر به کاهش تراکم در دوره پیک^{۱۵} می‌شود. علاوه بر این نتایج منعکس می‌کنند که سیستم‌های ذخیره‌ساز توانسته‌اند فرکانس سیستم را تحت شرایط اضطراری درون یک محدوده ایمن نگاه دارند. در [۱۹] به منظور مدیریت تراکم و ارتقای انعطاف سیستم از جایابی سیستم‌های ذخیره‌ساز و خازن‌های سری کنترل شونده توسط ترستور^{۱۶} (TCSC) استفاده شده است. به منظور مدیریت عدم قطعیت‌های بهره‌برداری از استراتژی شانس-مقید استفاده شده و مسئله به شکل خطی فرموله شده است. نویسندگان این تحقیق یک ورژن ارتقا یافته از الگوریتم گرگ خاکستری^{۱۷} را برای حل مسئله تحت مطالعه ارائه کرده و نتایج نشان می‌دهند که این الگوریتم به طور قابل توجهی سرعت و دقت حل را ارتقا داده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که نصب هر دو سیستم‌های ذخیره‌ساز و TCSC‌ها منجر به کاهش چشمگیر تراکم سیستم و متعاقباً کاهش حدود ۵۸٪ تراکم در شبکه شده است.

در دهه اخیر و با پیشرفت تکنولوژی‌های ارتباطی و همچنین تکنولوژی‌های مبتنی بر اینترنت اشیا^{۱۸} (IoT) بسیاری از کاربران نهایی به کاربران هوشمند تبدیل شده‌اند. این کاربران در بازار برق نقش بسیار پررنگی داشته و می‌توانند انعطاف بالایی برای بهره‌بردار سیستم فراهم کنند [۲۰]. در همین راستا، در [۲۱] نویسندگان تأثیر مشترکین هوشمند را بر روی شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم بررسی کرده‌اند. برای این هدف یک مدل سه هدفه ارائه شده که در آن هزینه بهره‌برداری، شاخص (PAR)^{۱۹} و انتشار دی‌اکسید کربن در نظر گرفته شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که مشترکین هوشمند از طریق کنترل مصرف تجهیزات داخلی خود منجر به ارتقای انعطاف سیستم شده‌اند. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهند که کاهش نسبی شاخص رفاه مشترکین هوشمند به طور قابل توجهی هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش می‌دهد.

لازم به ذکر می‌باشد که پژوهشگران حوزه بهینه‌سازی در سالیان اخیر توجه ویژه‌ای به مدل‌های چند سطحی کرده‌اند. این مدل‌ها فضای حل را به چندین بخش تقسیم کرده و منجر به کاهش حجم محاسبات می‌شوند. علاوه بر این امکان مدل‌سازی غیرمتمرکز مسائل بهینه‌سازی را به ما می‌دهند. در این راستا، در [۲۲] یک مدل شش سطحی برای تشکیل بازارهای رقابتی جهت تبادل برق، گاز و هیدروژن میان ریزشکده‌ها ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، مشترکین هوشمند و خودروهای الکتریکی مشارکت فعالی در بازار داشته‌اند. یکی از نقاط ضعف این مدل در نظر نگرفتن ارتباطات شبکه توزیع با شبکه انتقال بالادست می‌باشد. به طور مشابه در [۲۳] یک مدل دو سطحی برای بهره‌گیری از پتانسیل مشترکین هوشمند و خودروهای الکتریکی در بازارهای برق میان شبکه‌های انتقال و



توزیع ارائه شده است. در مدل پیشنهادی این مرجع از شرایط کاهن تاکر برای خطی‌سازی توابع هدف غیرخطی، استفاده شده است. یکی از نقاط ضعف این مدل، در نظر نگرفتن بازار خدمات جانبی می‌باشد. در [۲۴] یک مدل دو سطحی برای طراحی استراتژی پیشنهاددهی ریزشبه‌ها در بازارهای انرژی و خدمات جانبی ارائه شده که برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های برخاسته از تقاضای بار و خروجی توربین‌های بادی از تکنیک تصادفی مبتنی بر سناریو استفاده شده است. در این مرجع خودروهای الکتریکی و مشترکین هوشمند در نظر گرفته نشده و توربین‌های بادی نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای و نیروگاه‌های بادی تنها مشارکت‌کنندگان بازار می‌باشند. در [۲۵] یک مدل دو سطحی ارائه شده که در سطح اول آن مشترکین هوشمند برنامه بهینه خود را به بهره‌بردار سیستم ارائه داده و در سطح دوم بهره‌برداری سیستم با توجه به برنامه‌های بهینه مشترکین هوشمند انجام می‌شود. مدل دو سطحی به فرم خطی مدل شده و نتایج نشان می‌دهند که برنامه‌ریزی هماهنگ مشترکین هوشمند و شبکه منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که مشترکین هوشمند می‌توانند با تغییر برنامه‌ریزی خود انعطاف قابل توجهی برای بهره‌بردار سیستم توزیع در دوره پیک فراهم کنند. قابل ذکر می‌باشد که بازارهای خدمات جانبی و همچنین ارتباط میان شبکه‌های انتقال و توزیع در این تحقیق در نظر گرفته نشده‌اند. در [۲۶] یک مدل دو سطحی برای مدیریت بازار برق در یک سیستم توزیع متشکل از چندین ریزشبه در حضور مشترکین هوشمند ارائه شده که در آن از روش مبتنی بر ریسک برای مدیریت ریسک برنامه‌ریزی استفاده شده است. مدل مذکور به شکل خطی مدل شده و برای حل آن از حل‌کننده GUROBI در نرم‌افزار GAMS استفاده شده است. نتایج این تحقیق منعکس می‌کنند که خانه‌های هوشمند از طریق کنترل تجهیزات خود منجر به کاهش ریسک برنامه‌ریزی شده و متعاقباً هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش می‌دهند. بررسی مدل ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهد که این تحقیق نیز بهره‌برداری هماهنگ میان شبکه‌های انتقال توزیع و همچنین بازار خدمات جانبی را در نظر نگرفته است.

در جدول (۱) یک مقایسه جامع میان مدل پیشنهادی این مقاله با سایر مدل‌های ارائه شده در تحقیقات اخیر انجام شده است. از بررسی پژوهش‌های اخیر می‌توان فهمید که مطالعات محدودی بر روی تأثیر رفتار خانه‌های هوشمند و خودروهای الکتریکی بر روی بازارهای انرژی و خدمات جانبی میان شبکه‌های الکتریکی انتقال و توزیع انجام شده است. در واقع اکثر مقالاتی که خودروهای الکتریکی و مشترکین هوشمند را در نظر گرفته، بازارهای انرژی و خدمات جانبی میان شبکه‌های انتقال و توزیع را در نظر نگرفته‌اند. در مقابل می‌توان دید که پژوهش‌هایی که به ارزیابی بازارهای انرژی و خدمات جانبی میان شبکه‌های انتقال و توزیع پرداخته‌اند تأثیرات حضور همزمان مشترکین هوشمند و خودروهای الکتریکی را بر این بازارها بررسی نکرده‌اند. از این رو نویسندگان این مقاله یک مدل سه سطحی برای پوشش این خلاء ارائه داده‌اند. در مدل پیشنهادی، خانه‌های هوشمند می‌توانند از طریق تغییر زمان فعالیت وسایل قابل کنترل خود توسط مکانیزم اینترنت اشیا در بازارهای تنظیم بالا و پایین^{۲۰} مشارکت کنند. علاوه بر این خودروهای ساکنین خانه‌های هوشمند می‌توانند با تغییر برنامه شارژ و همچنین دشارژ کردن باتری خودروهای الکتریکی خود به شبکه سرویس‌های خودرو-به-شبکه^{۲۱} (V2G) ارائه داده و از این طریق از پتانسیل خودروهای الکتریکی خود برای مشارکت بیشتر در بازارهای تنظیم استفاده کنند. علاوه بر این، بخش قابل توجهی از نیازهای سیستم انتقال در بازار رزرو چرخان، از طریق منابع تولید پراکنده قرار گرفته در سیستم‌های توزیع تأمین خواهد شد. به طور کلی نوآوری‌های اصلی این مقاله به شرح زیر می‌باشند:

- ارائه یک چارچوب سه سطحی برای مدیریت همزمان بازارهای انرژی، رزرو و تنظیم میان شبکه‌های الکتریکی انتقال و توزیع یکپارچه شده با خانه‌های هوشمند و خودروهای الکتریکی
- استفاده از پتانسیل خانه‌های هوشمند و خودروهای الکتریکی برای کاهش هزینه‌های بازارهای تنظیم بالا و پایین
- تسویه بازارهای انرژی و خدمات جانبی با در نظر گرفتن برنامه‌های بهینه درخواستی سیستم‌های توزیع
- ارتقای شاخص‌های فنی و اقتصادی سیستم انتقال از طریق اعمال یک برنامه پاسخگویی تقاضا مبتنی بر قیمت بر روی واحدهای صنعتی بزرگ متصل به شبکه انتقال
- ارتقای شاخص‌های فنی و اقتصادی سیستم با مشارکت واحدهای تولیدی و سیستم‌های ذخیره‌ساز درون شبکه‌های توزیع در بازارهای انرژی و خدمات جانبی



جدول (۱): مقایسه مدل پیشنهادی در این مقاله با سایر مدل‌های ارائه شده در پژوهش‌های اخیر در زمینه مشترک

مرجع	تابع هدف	پخش بار	شبکه انتقال	شبکه توزیع	خانه‌های هوشمند	خودروهای الکتریکی	ذخیره‌ساز	منابع تجدیدپذیر	بازار رزرو	بازار تنظیم	عدم قطعیت‌ها
[۲۷]	هزینه	✓	✓	✓	×	×	✓	×	×	✓	×
[۸]	هزینه‌های بازار	×	✓	✓	×	×	✓	✓	×	✓	✓
[۹]	هزینه‌های بازار	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	✓	×	✓
[۱۰]	هزینه‌های بازار	×	✓	✓	×	×	✓	×	×	✓	✓
[۲۸]	هزینه بهره‌برداری	✓	✓	✓	×	×	×	×	×	×	×
[۲۹]	هزینه بهره‌برداری	✓	✓	✓	×	×	✓	×	×	×	×
[۳۰]	انحراف ولتاژ فلوی توان	✓	✓	✓	×	×	×	✓	×	×	✓
[۳۱]	هزینه بهره‌برداری انحراف ولتاژ قابلیت اطمینان	✓	✓	✓	×	×	×	×	×	×	×
[۳۲]	هزینه تراکم	×	✓	✓	×	×	✓	✓	✓	×	×
[۳۳]	رفاه اجتماعی هزینه بهره‌برداری	✓	✓	✓	×	×	×	✓	×	×	×
[۳۴]	هزینه بهره‌برداری	✓	✓	✓	×	×	×	×	×	×	×
[۲۵]	هزینه بهره‌برداری شاخص رفاه	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	×	×	✓
[۲۱]	هزینه بهره‌برداری کاهش اوج بار انتشار آلودگی	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	×	×	✓
[۳۵]	سود	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	✓
[۳۶]	هزینه بهره‌برداری	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	×	×	✓
[۳۷]	سود	✓	✓	✓	×	×	×	×	×	×	×
این مقاله	هزینه بهره‌برداری هزینه‌های بازار	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

۲- فرمولاسیون ریاضی مدل سه سطحی پیشنهادی

در این بخش، استراتژی سه سطحی پیشنهادی به یک مسئله ریاضی خطی مختلط عدد صحیح فرموله می‌شود. در سطح اول تا سوم به ترتیب برنامه‌ریزی خانه‌های هوشمند، سیستم‌های توزیع و سیستم انتقال بازار انجام می‌شود. توجه شود که برای ایمن کردن بهره‌برداری در برابر عدم قطعیت‌های تولید و مصرف، برنامه‌ریزی در فرم میثنی بر سناریو انجام می‌شود. برای این هدف، استراتژی پیشنهادی با در نظر گرفتن ۱۰ سناریو برای هر یک از پارامترهای بار، سرعت باد و تابش حل شده است. علاوه بر این به منظور جدا کردن تجهیزات شبکه‌های انتقال از توزیع از اندیس‌های S و T استفاده شده‌اند. در جدول (۲) تعریف مؤلفه‌های فرمولاسیون ارائه شده است.

جدول (۲): تعریف مؤلفه‌های فرمولاسیون

مؤلفه	تعریف
$P_{n,t}^{App}$	مصرف توان ساعتی لوازم خانگی هوشمند (مگاوات)
$P_e^{Ch,max} / P_e^{Dch,max}$	حداکثر شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (مگاوات)
$P_{max}^{Ch,EV} / P_{max}^{Dch,EV}$	حداکثر شارژ و دشارژ خودروهای برقی (مگاوات)
$P_g^{G,max}$	حداکثر تولید توان توربین‌های گازی (مگاوات)
$P_{e,f,s}^{Fix}$	مصرف توان غیرقابل کنترل خانه‌های هوشمند (مگاوات)
$P_{i,t,s}^{Load,Base}$	پروفیل بار ترجیحی خانه‌های هوشمند (مگاوات)
$P_{i,s}^{Total,REGU} / P_{i,s}^{Total,REGD}$	کل الزامات مقررات توسط شبکه انتقال (مگاوات)



نیاز رزرو پاسخگویی کل توسط شبکه انتقال (مگاوات)	$P_{t,s}^{Total,RRS}$
حداقل/ حداکثر تولید توان اکتیو واحدهای حرارتی (مگاوات)	$P_g^{T,min} / P_g^{T,max}$
توان بادی در دسترس (مگاوات)	$P_{w,t,s}^{WT,Available}$
توان خورشیدی در دسترس (مگاوات)	$P_{pv,t,s}^{PV,Available}$
ظرفیت مزرعه بادی (مگاوات)	$P_w^{WT,max}$
ظرفیت نیروگاه خورشیدی (مگاوات)	$P_{pv}^{PV,max}$
مصرف توان ساعتی لوازم خانگی هوشمند (مگاوات)	$P_{n,t}^{App}$
حداکثر شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (مگاوات)	$P_e^{Ch,max} / P_e^{Dch,max}$
حداکثر شارژ و دشارژ خودروهای برقی (مگاوات)	$P_{max}^{Ch,EV} / P_{max}^{Dch,EV}$
حداکثر تولید توان توربین‌های گازی (مگاوات)	$P_g^{G,max}$
مصرف توان غیرقابل کنترل خانه‌های هوشمند (مگاوات)	$P_{c,t,s}^{Fix}$
پروفیل بار ترجیحی خانه‌های هوشمند (مگاوات)	$P_{t,t,s}^{Load,Base}$
کل الزامات مقررات توسط شبکه انتقال (مگاوات)	$P_{t,s}^{Total,REGU} / P_{t,s}^{Total,REGD}$
نیاز رزرو پاسخگویی کل توسط شبکه انتقال (مگاوات)	$P_{t,s}^{Total,RRS}$
حداقل/ حداکثر تولید توان اکتیو واحدهای حرارتی (مگاوات)	$P_g^{T,min} / P_g^{T,max}$
توان بادی در دسترس (مگاوات)	$P_{w,t,s}^{WT,Available}$
توان خورشیدی در دسترس (مگاوات)	$P_{pv,t,s}^{PV,Available}$
توان شارژ/ دشارژ سیستم ذخیره‌سازی انرژی (مگاوات)	$P_{e,t,s}^{Ch} / P_{e,t,s}^{Dch}$
توان شارژ/ دشارژ خودروهای برقی (مگاوات)	$P_{c,t,s}^{Ch,EV} / P_{c,t,s}^{Dch,EV}$
مشارکت تنظیم بازار بالادست/ پایین‌دست سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی (مگاوات)	$P_{e,t,s}^{ESD,REGU} / P_{e,t,s}^{ESD,REGD}$
کاهش و افزایش بار در برنامه پاسخگویی بار (مگاوات)	$P_{i,t,s}^{DR-} / P_{i,t,s}^{DR+}$
تولید توان اکتیو/ راکتیو توربین‌های گازی (مگاوات/ مگاوار)	$P_{g,t,s}^G / Q_{g,t,s}^G$
مشارکت پاسخگو در بازار ذخیره توربین‌های گازی (مگاوات)	$P_{g,t,s}^{G,RRS}$
مشارکت تنظیم بازار بالادست/ پایین‌دست توربین‌های گازی (مگاوات)	$P_{g,t,s}^{G,REGU} / P_{g,t,s}^{G,REGD}$
پخش بار اکتیو/ راکتیو در خطوط انتقال و توزیع (مگاوات/ مگاوار)	$P_{l,t,s}^{Line} / Q_{l,t,s}^{Line}$
تلفات توان اکتیو (مگاوات)	$P_{l,t,s}^{Loss}$
تقاضای اکتیو/ راکتیو در گره‌های الکتریکی (مگاوات/ مگاوار)	$P_{i,t,s}^{Load} / Q_{i,t,s}^{Load}$
مصرف توان اکتیو/ راکتیو شبکه‌های توزیع در PCC (مگاوات)	$P_{d,t,s}^{PCC} / Q_{d,t,s}^{PCC}$
تولید توان نیروگاه‌های خورشیدی (مگاوات)	$P_{pv,t,s}^{PV}$
تولید توان مزرعه‌های بادی (مگاوات)	$P_{w,t,s}^{WT}$
مصرف توان خانه‌های هوشمند (دلار)	$P_{c,t,s}^{Usage}$
مشارکت تنظیم بازار بالادست/ پایین‌دست خانه‌های هوشمند (مگاوات)	$P_{c,t,s}^{Usage,REGU} / P_{c,t,s}^{Usage,REGD}$
مشارکت بازار رزرو پاسخگو شبکه‌های توزیع (مگاوات)	$P_{d,t,s}^{Total,RRS}$
تولید توان اکتیو/ راکتیو واحدهای حرارتی (مگاوات/ مگاوار)	$P_{g,t,s}^T / Q_{g,t,s}^T$
مشارکت بازار رزرو پاسخگو واحدهای حرارتی (مگاوات)	$P_{g,t,s}^{T,RRS}$
مشارکت بازار تنظیم بالادست/ پایین‌دست واحدهای حرارتی (مگاوات)	$P_{g,t,s}^{T,REGU} / P_{g,t,s}^{T,REGD}$
توان شارژ/ دشارژ سیستم ذخیره‌سازی انرژی (مگاوات)	$P_{e,t,s}^{Ch} / P_{e,t,s}^{Dch}$
توان شارژ/ دشارژ خودروهای برقی (مگاوات)	$P_{c,t,s}^{Ch,EV} / P_{c,t,s}^{Dch,EV}$
مشارکت تنظیم بازار بالادست/ پایین‌دست سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی (مگاوات)	$P_{e,t,s}^{ESD,REGU} / P_{e,t,s}^{ESD,REGD}$
کاهش و افزایش بار در برنامه پاسخگویی بار (مگاوات)	$P_{i,t,s}^{DR-} / P_{i,t,s}^{DR+}$
تولید توان اکتیو/ راکتیو توربین‌های گازی (مگاوات/ مگاوار)	$P_{g,t,s}^G / Q_{g,t,s}^G$
مشارکت پاسخگو در بازار ذخیره توربین‌های گازی (مگاوات)	$P_{g,t,s}^{G,RRS}$
مشارکت تنظیم بازار بالادست/ پایین‌دست توربین‌های گازی (مگاوات)	$P_{g,t,s}^{G,REGU} / P_{g,t,s}^{G,REGD}$
هزینه بهره‌برداری سیستم ذخیره‌سازی انرژی (دلار)	$C_{e,t,s}^{ESD}$



هزینه بهره‌برداری توربین‌های گازی (دلار)
 هزینه متغیر توربین‌های گازی (دلار)
 هزینه بهره‌برداری خانه‌های هوشمند (دلار)
 هزینه بهره‌برداری واحدهای حرارتی (دلار)
 هزینه بهره‌برداری سیستم ذخیره‌سازی انرژی (دلار)
 هزینه بهره‌برداری توربین‌های گازی (دلار)

$C_{g,t,s}^G$
 $C_{g,t,s}^{G, Gas}$
 $C_{c,t,s}^{Usage}$
 $C_{g,t,s}^T$
 $C_{e,t,s}^{ESD}$
 $C_{g,t,s}^G$

۱-۲- سطح اول

در سطح اول مدل پیشنهادی، برنامه‌ریزی روزانه خانه‌های هوشمند با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های آن‌ها انجام می‌شود. لازم به ذکر می‌باشد که این تابع هدف را با توجه به مفهوم پیشنهادی این مقاله طراحی کرده‌ایم. در مفهوم پیشنهادی ما، خانه‌های هوشمند برنامه‌ریزی خود را با امکان مشارکت در بازار تنظیم انجام می‌دهند، زیرا مجهز به وسایل قابل کنترل، پنل‌های خورشیدی و وسایل ذخیره‌ساز می‌باشند. معادله (۱) تابع هدف سطح اول را نشان می‌دهد که متشکل از هزینه خرید انرژی از شبکه، هزینه بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز و سودهای ناشی از مشارکت در بازار تنظیم می‌باشد. معادلات (۲) و (۳) نشان می‌دهند که خانه‌های هوشمند می‌توانند از طریق تغییر بار مصرفی‌شان و همچنین شارژ/دشارژ سیستم ذخیره‌ساز تحت مالکیت‌شان می‌توانند در بازار تنظیم شرکت کنند. توجه شود که تغییر بار مصرفی خانه‌های هوشمند از طریق تغییر زمان فعالیت وسایل قابل کنترل آن‌ها محقق می‌شود. خروجی سطح اول، برنامه مشارکت خانه‌های هوشمند در بازارهای انرژی (توان خریداری شده/فروخته شده به شبکه) و تنظیم (ظرفیت اختصاص داده شده به بازارهای رزرو بالا و پایین) می‌باشد که به بهره‌برداران سیستم‌های توزیع ارسال می‌شود.

$$F_c^1 = \sum_s \rho_s \left[\sum_t C_{c,t,s}^{Usage} - \sum_t (\lambda_{t,s}^{REGU} P_{c,t,s}^{Total,REGU} + \lambda_{t,s}^{REGD} P_{c,t,s}^{Total,REGD}) \Delta t^{REG} \right] \quad (1)$$

$$P_{c,t,s}^{Total,REGU} = P_{c,t,s}^{Usage,REGU} \quad (2)$$

$$P_{c,t,s}^{Total,REGD} = P_{c,t,s}^{Usage,REGD} \quad (3)$$

۲-۲- سطح دوم

در معادله (۴) تابع هدف سطح دوم را ارائه کرده‌ایم که کاملاً مطابق با مفهوم پیشنهادی ما مدل شده است. در این سطح، برنامه‌ریزی روزانه سیستم‌های توزیع با هدف حداکثرسازی سود آن‌ها و در نظر گرفتن برنامه خانه‌های هوشمند انجام می‌شود. همانطور که از معادله (۴) می‌توان دید، سود ناشی از مشارکت در بازارهای انرژی، رزرو و تنظیم در تابع هدف سیستم‌های توزیع در نظر گرفته شده است. همچنین می‌توان دید که هزینه پرداختی به خانه‌های هوشمند به دلیل مشارکت در بازار تنظیم و هزینه بهره‌برداری از تجهیزات از سود سیستم‌های توزیع کسر شده‌اند. لازم به ذکر می‌باشد که این تابع برای هر سیستم توزیع به طور جداگانه حل شده تا غیرمتمرکز بودن مدل تضمین شود. معادله (۵) نشان می‌دهد که توربین‌های گازی و نیروگاه‌های خورشیدی^{۳۲} منابع تأمین‌کننده ظرفیت رزرو می‌باشند. معادلات (۶) و (۷) نیز نشان می‌دهند که علاوه بر خانه‌های هوشمند، توربین‌های گازی، نیروگاه‌های خورشیدی^{۳۳} و سیستم‌های ذخیره‌ساز قرار گرفته در سیستم توزیع می‌توانند بخشی از ظرفیت خود را به بازار رزرو اختصاص دهند. خروجی سطح دوم، برنامه مشارکت سیستم‌های توزیع در بازارهای انرژی، رزرو و تنظیم می‌باشد که به بهره‌بردار سیستم انتقال ارسال می‌شود.

$$F_d^2 = \sum_s \rho_s \left[\sum_d \sum_t \lambda_{t,s}^{Energy} P_{d,t,s}^{PCC} + \sum_t \lambda_{t,s}^{RRS} P_{d,t,s}^{Total,RRS} \Delta t^{RRS} + \sum_t (\lambda_{t,s}^{REGU} P_{d,t,s}^{Total,REGU} + \lambda_{t,s}^{REGD} P_{d,t,s}^{Total,REGD}) \Delta t^{REG} \right. \\ \left. - \sum_t \left(\sum_{g \in \Delta_d^g} C_{g,t,s}^G + \sum_{e \in \Delta_d^e} C_{e,t,s}^{EES} \right) - \sum_{c \in \Delta_d^c} \left(\sum_t (\lambda_{t,s}^{REGU} \widehat{P}_{c,t,s}^{Total,REGU} + \lambda_{t,s}^{REGD} \widehat{P}_{c,t,s}^{Total,REGD}) \Delta t^{REG} \right) \right] \quad (4)$$

$$P_{d,t,s}^{Total,RRS} = \sum_{g \in \Delta_d^g} P_{g,t,s}^{G,RRS} + \sum_{pv \in \Delta_d^{pv}} P_{pv,t,s}^{PV,RRS} \quad (5)$$



$$P_{d,t,s}^{Total,REGU} = \sum_{g \in \Delta_d^g} P_{g,t,s}^{G,REGU} + \sum_{e \in \Delta_d^e} P_{e,t,s}^{Dch,REGU} + \sum_{pv \in \Delta_d^{pv}} P_{pv,t,s}^{PV,REGU} + \sum_{c \in \Delta_d^c} \widehat{P}_{c,t,s}^{Total,REGU} \quad (6)$$

$$P_{d,t,s}^{Total,REGD} = \sum_{g \in \Delta_d^g} P_{g,t,s}^{G,REGD} + \sum_{e \in \Delta_d^e} P_{e,t,s}^{Ch,REGD} + \sum_{pv \in \Delta_d^{pv}} P_{pv,t,s}^{PV,REGD} + \sum_{c \in \Delta_d^c} \widehat{P}_{c,t,s}^{Total,REGD} \quad (7)$$

۲-۳- سطح سوم

در سطح سوم از مدل پیشنهادی، برنامه‌ریزی سیستم انتقال با در نظر گرفتن برنامه‌های سیستم‌های توزیع و با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های روزانه انجام می‌شود. معادله (۸) تابع هدف سیستم انتقال را ارائه می‌دهد که متشکل از هزینه بهره‌برداری از تجهیزات سیستم انتقال و هزینه‌های مرتبط با بازارهای انرژی و رزرو و تنظیم می‌باشد. قابل ذکر می‌باشد که این تابع هدف را منطبق بر مفهوم پیشنهادی این مقاله مدل کرده‌ایم. معادلات (۹) تا (۱۱) بیان می‌کنند که بهره‌بردار سیستم انتقال باید کمبود ظرفیت‌های بازارهای انرژی و رزرو و تنظیم بالا و پایین را توسط واحدهای حرارتی، مزارع بادی^{۲۴} و سیستم‌های قرار گرفته در سیستم انتقال تأمین کند.

$$F^3 = \sum_s \rho_s \left[\sum_t \left(\sum_g C_{g,t,s}^T + \sum_{e \in \Delta_{TSO}^e} C_{e,t,s}^{EES} \right) + \sum_t \lambda_{t,s}^{RRS} P_{t,s}^{Total,RRS} \Delta t^{RRS} \right. \\ \left. + \sum_t \left(\lambda_{t,s}^{REGU} P_{t,s}^{Total,REGU} + \lambda_{t,s}^{REGD} P_{t,s}^{Total,REGD} \right) \Delta t^{REG} - \sum_d \sum_t \lambda_{t,s}^{Energy} \widehat{P}_{d,t,s}^{PCC} \right] \quad (8)$$

$$P_{t,s}^{Total,RRS} = \sum_{g \in \Delta_d^g} P_{g,t,s}^{T,RRS} + \sum_{e \in \Delta_{TSO}^e} P_{e,t,s}^{Dch,RRS} + \sum_{w \in \Delta_{TSO}^w} P_{w,t,s}^{WT,RRS} + \sum_d \widehat{P}_{d,t,s}^{Total,RRS} \geq P_{t,s}^{Require,RRS} \quad (9)$$

$$P_{t,s}^{Total,REGU} = \sum_{g \in \Delta_d^g} P_{g,t,s}^{T,REGU} + \sum_{e \in \Delta_{TSO}^e} P_{e,t,s}^{Dch,REGU} + \sum_{w \in \Delta_{TSO}^w} P_{w,t,s}^{WT,REGU} + \sum_d \widehat{P}_{d,t,s}^{Total,REGU} \geq P_{t,s}^{Require,REGU} \quad (10)$$

$$P_{t,s}^{Total,REGD} = \sum_{g \in \Delta_d^g} P_{g,t,s}^{T,REGD} + \sum_{e \in \Delta_{TSO}^e} P_{e,t,s}^{Dch,REGD} + \sum_{w \in \Delta_{TSO}^w} P_{w,t,s}^{WT,REGD} + \sum_d \widehat{P}_{d,t,s}^{Total,REGD} \geq P_{t,s}^{Require,REGD} \quad (11)$$

۲-۴- پخش بار

روابط مورد نیاز برای مدل‌سازی یک برنامه پخش بار AC خطی شده که بر روی هر دو سیستم‌های انتقال و توزیع اجرا شده، در (۱۲) تا (۲۱) ارائه شده‌اند [۲۵]. در این راستا توان‌های اکتیو و راکتیو خط l به ترتیب توسط معادلات (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود. معادله (۱۴) تلفات توان در خطوط را محاسبه می‌کند. قید (۱۵) فلوئی توان ظاهری خط l در زمان t را محدود می‌کند. قیود (۱۶) و (۱۷) از تجاوز اندازه ولتاژ و زاویه آن از محدوده‌های مجاز آن‌ها جلوگیری می‌کند. معادلات (۱۸) و (۱۹) به منظور تضمین تعادل توان‌های اکتیو و راکتیو در سیستم‌های توزیع ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است، که به منظور اجرای برنامه پخش بار AC خطی بر روی سیستم انتقال از معادلات (۲۰) و (۲۱) به جای معادلات (۱۸) و (۱۹) استفاده می‌شود، زیرا روابط مورد نیاز برای تضمین تعادل توان‌های اکتیو و راکتیو در سیستم انتقال با سیستم‌های توزیع متفاوت می‌باشد.

$$P_{l,t,s}^{Line} = G_l (V_{i,t,s} - V_{j,t,s}) + B_l (\theta_{i,t,s} - \theta_{j,t,s}) \quad (12)$$

$$Q_{l,t,s}^{Line} = B_l (V_{i,t,s} - V_{j,t,s}) - G_l (\theta_{i,t,s} - \theta_{j,t,s}) \quad (13)$$

$$P_{l,t,s}^{Loss} = R_l \left[(P_{l,t,s}^{Line})^2 + (Q_{l,t,s}^{Line})^2 \right] \quad (14)$$

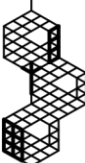
$$-S_l^{Line,max} I_{l,t,s}^{Line} \leq (P_{l,t,s}^{Line})^2 + (Q_{l,t,s}^{Line})^2 \leq S_l^{Line,max} I_{l,t,s}^{Line} \quad (15)$$

$$V^{min} \leq V_{i,t,s} \leq V^{max} \quad (16)$$

$$\theta^{min} \leq \theta_{i,t,s} \leq \theta^{max} \quad (17)$$

$$P_{d,t,s}^{PCC} \Big|_{i=PCC_d} + \sum_{g \in \Delta_d^g} P_{g,t,s}^G + \sum_{pv \in \Delta_d^{pv}} P_{pv,t,s}^{PV} + \sum_{e \in \Delta_d^e} (P_{e,t,s}^{Dch} - P_{e,t,s}^{Ch}) = \sum_{l \in \Delta_d^l} \xi_{l,i} \left(P_{l,t,s}^{Line} + \frac{P_{l,t,s}^{Loss}}{2} \right) + \sum_{c \in \Delta_d^c} P_{c,t,s}^{Usage} \quad (18)$$

$$Q_{d,t,s}^{PCC} \Big|_{i=PCC_d} + \sum_{g \in \Delta_d^g} Q_{g,t,s}^G = \sum_{l \in \Delta_d^l} \xi_{l,i} Q_{l,t,s}^{Line} + \sum_{c \in \Delta_d^c} \tan(\varphi_i) P_{c,t,s}^{Usage} \quad (19)$$



$$\sum_{g \in \Delta_g^T} P_{g,t,s}^T + \sum_{g \in \Delta_g^{WT}} P_{w,t,s}^{WT} + \sum_{e \in \Delta_e^C} (P_{e,t,s}^{Dch} - P_{e,t,s}^{Ch}) = P_{i,t,s}^{Load} + \sum_{l \in \Delta_l^L} \xi_{l,t} \left(P_{l,t,s}^{Line} + \frac{P_{l,t,s}^{Loss}}{2} \right) + \sum_{d \in \Delta_d^D} P_{d,t,s}^{PCC} \quad (20)$$

$$\sum_{g \in \Delta_g^T} Q_{g,t,s}^T = \sum_{l \in \Delta_l^L} \xi_{l,t} Q_{l,t,s}^{Line} + \sum_{d \in \Delta_d^D} Q_{d,t,s}^{PCC} \quad (21)$$

۲-۵- واحدهای تولیدی قرار گرفته در شبکه انتقال

روابط (۲۲) تا (۲۹) واحدهای تولیدی قرار گرفته بر روی سیستم انتقال را مدل کرده که شامل واحدهای حرارتی و توربین‌های بادی می‌باشد [۲۳]. در این راستا قیود (۲۲) و (۲۳) برای حفظ توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی واحدهای حرارتی در محدوده‌های مجاز فراهم شده‌اند. معادله (۲۴) نشان بیان می‌کند که عملکرد واحدهای حرارتی تابعی از محدودیت‌های شیب^{۲۵} افزایشی و کاهش می‌باشد. معادلات (۲۵) و (۲۶) هزینه‌های مرتبط با روشن و خاموش شدن واحد را محاسبه می‌کنند. معادله (۲۷) هزینه بهره‌برداری کل واحدهای حرارتی را محاسبه می‌کند که متشکل از هزینه‌های روشن و خاموش شدن و همچنین توان تولید شده توسط این واحدها می‌باشد. برای محاسبه توان تولیدی مزارع بادی از تابع ارائه شده در (۲۸) استفاده می‌شود، جایی که بخش اول آن منعکس می‌کند که اگر سرعت باد در زمان t و سناریو s خارج از یک محدوده از پیش تعیین شده باشد، سطح تولید توربین‌های بادی برابر با صفر خواهد بود. از بخش دوم تابع ارائه شده در (۲۹) نیز می‌توان درک کرد که در صورتی که سرعت باد بین سرعت‌های متصل و مجاز باشد، توان تولیدی توربین‌های بادی از طریق یک تابع درجه دوم محاسبه خواهد شد. در نهایت بخش سوم این تابع نشان‌دهنده تولید توان نامی در صورت قرارگیری سرعت باد در محدوده میان سرعت‌های نامی و قطع می‌باشد. قید (۳۰) توان تولیدی مزارع بادی را محدود می‌کند. این قید همچنین نشان می‌دهد که بخشی از ظرفیت مزارع بادی می‌تواند به بازارهای رزرو و تنظیم اختصاص داده شود.

$$P_g^{T,\min} I_{g,t,s}^T + P_{g,t,s}^{T,REGD} \leq P_{g,t,s}^T \leq P_g^{T,\max} I_{g,t,s}^T - P_{g,t,s}^{T,RRS} - P_{g,t,s}^{T,REGU} \quad (22)$$

$$P_g^{T,\min} I_{g,t,s}^T \leq Q_{g,t,s}^T \leq Q_g^{T,\max} I_{g,t,s}^T \quad (23)$$

$$-RD_g \leq (P_{g,t,s}^T + P_{g,t,s}^{T,RRS} + P_{g,t,s}^{T,REGU}) - (P_{g,t-1,s}^T + P_{g,t,s}^{T,REGD}) \leq RU_g \quad (24)$$

$$SUC_{g,t,s} \geq (I_{g,t,s}^T - I_{g,t-1,s}^T) \lambda_g^{SUC} \quad (25)$$

$$SDC_{g,t,s} \geq (I_{g,t-1,s}^T - I_{g,t,s}^T) \lambda_g^{SDC} \quad (26)$$

$$C_{g,t,s}^T = \lambda_g^{MC} P_{g,t,s}^G \Delta t + SUC_{g,t,s} \Delta t + SDC_{g,t,s} \Delta t \quad (27)$$

$$P_{w,t,s}^{WT,Available} = \begin{cases} 0 & , v_{t,s} < v_{ci} \quad \text{Or} \quad v_{t,s} \geq v_{co} \\ P_w^{WT,\max} \left(\frac{v_{t,s}^2 - v_{ci}^2}{v_r^2 - v_{ci}^2} \right) & , v_{ci} \leq v_{t,s} < v_r \\ P_w^{WT,\max} & , v_r \leq v_{t,s} < v_{co} \end{cases} \quad (28)$$

$$P_{w,t,s}^{WT,REGD} \leq P_{w,t,s}^{WT} \leq P_{w,t,s}^{WT,Available} - P_{w,t,s}^{WT,RRS} - P_{w,t,s}^{WT,REGU} \quad (29)$$

۲-۶- واحدهای تولیدی قرار گرفته در شبکه توزیع

توربین‌های گازی و نیروگاه‌های خورشیدی قرار گرفته در سیستم‌های توزیع توسط معادلات (۳۰) تا (۳۵) در مدل گنجانده شده‌اند [۲۳]. قید (۳۰) محدودیت‌های بالا و پایین تولید توان اکتیو توسط توربین‌های گازی را مدل می‌کند. این قید به توربین‌های گازی اجازه می‌دهد که بخشی از ظرفیت خود را به بازارهای رزرو و تنظیم اختصاص دهند. قید (۳۱) محدوده مجاز تولید توان راکتیو توسط توربین‌های گازی را تعیین می‌کند. هزینه بهره‌برداری از توربین‌های گازی نیز مطابق با معادله (۳۲) محاسبه می‌شود که متشکل از دو بخش ثابت و متغیر می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که بخش ثابت برای هر توربین متفاوت است در حالی که بخش متغیر به قیمت ساعتی گاز وابسته بوده و توسط معادله (۳۳) محاسبه می‌شود. به راندمان توربین و قیمت ساعتی گاز وابسته می‌باشد. معادله (۳۴) نشان می‌دهد که توان استخراج شده از مزارع خورشیدی به تابش ساعتی، راندمان و ظرفیت این مزارع بستگی دارد. قید (۳۵) نشان می‌دهد که توان استخراج شده از نیروگاه‌های خورشیدی باید درون یک محدوده از پیش تعیین شده باشد. علاوه بر این قید مشارکت نیروگاه‌های خورشیدی در بازارهای رزرو و تنظیم امکان‌پذیر می‌کند.

$$P_{g,t,s}^{G,REGD} \leq P_{g,t,s}^G \leq P_g^{G,\max} - P_{g,t,s}^{G,RRS} - P_{g,t,s}^{G,REGU} \quad (30)$$

$$-\alpha_g^{\max} P_{g,t,s}^G \leq Q_{g,t,s}^G \leq \alpha_g^{\max} P_{g,t,s}^G \quad (31)$$



$$C_{g,t,s}^G = \lambda_g^G P_{g,t,s}^G \Delta t \quad (32)$$

$$C_{g,t,s}^{G, Gas} = \lambda_t^{Gas} \frac{3.6 P_{g,t,s}^G}{\eta^G M^G HHV^G} \quad (33)$$

$$P_{pv,t,s}^{PV, Available} = \eta^{PV} \frac{G_{t,s}}{G_{STD}} P_{pv}^{PV, max} \quad (34)$$

$$P_{pv,t,s}^{PV, REGD} \leq P_{pv,t,s}^{PV} \leq P_{pv,t,s}^{PV, Available} - P_{pv,t,s}^{PV, RRS} - P_{pv,t,s}^{PV, REGU} \quad (35)$$

۲-۷- سیستم‌های ذخیره‌ساز

در مدل پیشنهادی، سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی در کنار منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی قرار گرفته که مدل‌سازی آن‌ها در (۳۶) تا (۴۴) ارائه شده‌اند [۲۳]. معادله (۳۶) برای محاسبه سطح انرژی سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی در زمان t ارائه شده در حالی که قید (۳۷) مرزهای حداقل و حداکثر سطح انرژی را محدود می‌کند. قیدهای (۳۸) و (۳۹) میزان تزریق و استخراج توان به سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی را محدود می‌کنند. این قیود منعکس می‌کنند که وسایل ذخیره‌ساز الکتریکی می‌توانند بخشی از ظرفیت خود را به بازار رزرو اختصاص دهند. توسط قید (۴۰) سطح انرژی در ابتدا و انتهای بهره‌برداری بر روی یک مقدار مشخص تنظیم می‌شود. قید (۴۱) نشان می‌دهد که تزریق و استخراج همزمان توان از ذخیره‌ساز امکان‌پذیر نمی‌باشد. قید (۴۲) میزان مشارکت ذخیره‌ساز در بازار رزرو بالا را مقید به سطح شارژ ساعتی جاری می‌کند. به طور مشابه، قید (۴۳) میزان مشارکت ذخیره‌ساز در بازار تنظیم پایین را مقید به ظرفیت خالی آن می‌کند. معادله (۴۴) منعکس می‌کند که هزینه بهره‌برداری از سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی تابعی از میزان تزریق و استخراج توان به/از آن‌ها می‌باشد.

$$E_{e,t,s} = E_{e,t-1,s} + \left(\eta^{Ch} P_{e,t,s}^{Ch} - \frac{P_{e,t,s}^{Dch}}{\eta^{Dch}} \right) \Delta t \quad (36)$$

$$E_e^{Min} \leq E_{e,t,s} \leq E_e^{Max} \quad (37)$$

$$0 \leq P_{e,t,s}^{Ch} + P_{e,t,s}^{Ch, REGD} \leq P_e^{Ch, max} I_{e,t,s}^{Ch} \quad (38)$$

$$0 \leq P_{e,t,s}^{Dch} + P_{e,t,s}^{Dch, REGU} \leq P_e^{Dch, max} I_{e,t,s}^{Dch} \quad (39)$$

$$E_{e,t=0,s} = E_{e,t=24,s} = E_e^{Initial} \quad (40)$$

$$0 \leq I_{e,t,s}^{Ch} + I_{e,t,s}^{Dch} \leq 1 \quad (41)$$

$$\left(P_{e,t,s}^{Dch} - P_{e,t,s}^{Ch} \right) \Delta t + P_{e,t,s}^{Dch, REGU} \Delta t^{REG} \leq E_{e,t,s} \quad (42)$$

$$E_{e,t,s} + \left(P_{e,t,s}^{Dch} - P_{e,t,s}^{Ch} \right) \Delta t + P_{e,t,s}^{Ch, REGD} \Delta t^{REG} \leq E_e^{Max} \quad (43)$$

$$C_{e,t,s}^{EES} = \lambda^{EES} \left(P_{e,t,s}^{Ch} + P_{e,t,s}^{Dch} \right) \quad (44)$$

۲-۸- خودروهای الکتریکی و خانه‌های هوشمند

در این مطالعه فرض شده است که هر خانه هوشمند مالک یک خودرو الکتریکی بوده که از آن برای ارائه سرویس‌های V2G استفاده می‌کند [۲۳]. معادله (۴۵) تا (۵۱) قیود بهره‌برداری از این خودروها را مدل می‌کنند. در این راستا سطح انرژی باتری خودرو الکتریکی در هر ساعت از طریق معادله (۴۵) مشخص می‌شود. قید (۴۶) به منظور حفظ سطح شارژ باتری خودرو الکتریکی در یک محدوده ایمن ارائه شده است. معادله (۴۷) بیان می‌کند که سطح شارژ باتری خودرو الکتریکی در زمان رسیدن به خانه باید برابر با انرژی ذخیره شده اولیه خودروی برقی باشد. انرژی ذخیره شده اولیه خودروی برقی یک پارامتر تصادفی می‌باشد که مقدار آن بین ۳۵٪ تا ۴۵٪ ظرفیت باتری بوده و توسط تابع توزیع یکنواخت تولید می‌شود. قید (۴۸) بیان می‌کند که باتری خودرو الکتریکی در هنگام ترک خانه باید کاملاً شارژ باشد. به ترتیب قیود (۴۹) و (۵۰) تزریق و استخراج توان به/از باتری خودرو الکتریکی را محدود می‌کنند، قید (۵۱) نشان می‌دهد تزریق و استخراج توان به/از باتری خودرو الکتریکی مجاز نمی‌باشد. در نهایت قید (۵۲) بیان می‌کند که در صورت عدم حضور خودرو الکتریکی در خانه امکان بهره‌برداری از آن وجود ندارد.

$$E_{c,t,s}^{EV} = E_{c,t-1,s}^{EV} + \left(P_{c,t,s}^{Ch, EV} \eta^{Ch, EV} - \frac{P_{c,t,s}^{Dch, EV}}{\eta^{Ch, EV}} \right) \Delta t \quad (45)$$

$$E_{min}^{EV} \leq E_{c,t,s}^{EV} \leq E_{max}^{EV} \quad (46)$$



$$E_{c,t=t^Ar,s}^{EV,Initial} = E_{c,s}^{Ar} \quad (47)$$

$$E_{c,t=t^{Dp},s}^{EV} = E_{c,s}^{EV,Final} \quad (48)$$

$$0 \leq P_{c,t,s}^{Ch,EV} \leq E_{max}^{Ch,EV} I_{c,t,s}^{Ch} \quad (49)$$

$$0 \leq P_{c,t,s}^{Dch,EV} \leq E_{max}^{Dch,EV} I_{c,t,s}^{Dch} \quad (50)$$

$$I_{c,t,s}^{Ch} + I_{c,t,s}^{Dch} \leq 1, \quad T^{Ar} \leq t \leq T^{Dp} \quad (51)$$

$$I_{c,t,s}^{Ch} + I_{c,t,s}^{Dch} = 0, \quad t < t^{Ar} \text{ or } t > t^{Dp} \quad (52)$$

بهره‌برداری از تجهیزات مبتنی بر اینترنت اشیا خانه‌های هوشمند مطابق با روابط (۵۳) تا (۶۴) انجام می‌شود [۲۵]. با استفاده از مفهوم اینترنت اشیا، خانه‌های هوشمند می‌توانند هر یک از تجهیزات خود را به صورت هوشمند و با توجه به پالس قیمت کنترل کنند. در این مقاله فرض شده است که هر خانه هوشمند یک سیستم کنترل مرکزی دارد و با توجه به قیمت برق زمان فعال/ غیرفعال شدن تجهیزات مبتنی بر اینترنت اشیا را تعیین می‌کند. توجه شود که خانه‌های هوشمند تحت مطالعه دارای پنل‌های خورشیدی، سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی بوده که بخش قابل توجهی از توان مورد نیاز خود را از طریق آن‌ها تأمین می‌کنند. معادله (۵۳) برای محاسبه بار مصرفی خالص هر خانه هوشمند فراهم شده است. قید (۵۴) توان مصرفی خانه هوشمند را محدود می‌کند، که تابعی از ظرفیت کنتور خانه و میزان مشارکت در بازار تنظیم می‌باشد. معادله (۵۵) مجموع بار تجهیزات مبتنی بر اینترنت اشیا خانه هوشمند را محاسبه می‌کند. به منظور تضمین بهره‌برداری کامل از تجهیزات مبتنی بر اینترنت اشیا معادله (۵۶) ارائه شده است. برای تعیین پرچم^۶ فعال/ غیرفعال هر تجهیز مبتنی بر اینترنت اشیا در زمان t معادله (۵۷) فراهم شده است. قید (۵۸) بیان می‌کند که فعال و غیرفعال شدن همزمان تجهیز مبتنی بر اینترنت اشیا امکان‌پذیر نمی‌باشد. معادله (۵۹) نشان می‌دهد که هر تجهیز مبتنی بر اینترنت اشیا تنها یکبار می‌تواند در دوره بهره‌برداری فعال/ غیرفعال شود. قید (۶۰) به منظور تضمین فعال شدن تجهیز مبتنی بر اینترنت اشیا وابسته پس از غیرفعال شدن تجهیز مبتنی بر اینترنت اشیا مستقل ارائه شده، در حالی که قید (۶۱) ماکزیمم فاصله زمانی مجاز میان بهره‌برداری از تجهیزات وابسته و مستقل را محدود می‌کند. شاخص رضایتمندی ساکنین خانه‌های هوشمند از طریق تابع ارائه شده در (۶۲) محاسبه می‌شود. این تابع آشکار می‌کند که شاخص رضایتمندی ساکنین به طور مستقیم به بازه زمانی فعال شدن تجهیزات مبتنی بر اینترنت اشیا بستگی دارد. معادله (۶۳) برای مدل کردن پنل‌های خورشیدی نصب شده بر روی سقف خانه‌های هوشمند ارائه شده است. توجه شود که ذخیره‌ساز الکتریکی قرار گرفته در خانه‌های هوشمند مشابه با ذخیره‌سازهای الکتریکی قرار گرفته بر روی شبکه مدل می‌شود (معادلات ۳۶ تا ۴۴). در نهایت، معادله (۶۴) برای محاسبه هزینه بهره‌برداری خانه‌های هوشمند ارائه شده، که در آن هزینه پرداختی برای خرید توان از شبکه و همچنین هزینه‌های بهره‌برداری از ذخیره‌ساز الکتریکی و باتری خودرو الکتریکی گنجانده شده‌اند.

$$P_{c,t,s}^{Usage} = P_{c,t,s}^{Fix} + P_{c,t}^{Apps} - P_{pv,t,s}^{PV} - (P_{c,t,s}^{Dch,EV} - P_{c,t,s}^{Ch,EV}) + \sum_{e \in \Delta_c^e} (P_{e,t,s}^{Dch} - P_{e,t,s}^{Ch}) \quad (53)$$

$$P_{c,t,s}^{Usage,REGU} \leq P_{c,t,s}^{Usage} \leq P_{c,t,s}^{Usage,max} - P_{c,t,s}^{Usage,REGD} \quad (54)$$

$$P_{c,t}^{Apps} = \sum_{n=1}^N (P_{n,t,s}^{App} I_{n,c,t}^{App}) \quad (55)$$

$$\sum_{t \geq T_n^s}^{t \leq T_n^e} I_{n,c,t}^{App} = UT_n \quad (56)$$

$$I_{n,c,t}^S - I_{n,c,t}^E = I_{n,c,t}^{App} - I_{n,c,t-1}^{App} \quad (57)$$

$$I_{n,c,t}^S + I_{n,c,t}^E \leq 1 \quad (58)$$

$$\sum_{t \geq \alpha_n}^{t \leq \beta_n} (I_{n,c,t}^S + I_{n,c,t}^E) = 2 \quad (59)$$

$$\sum_{t \geq \alpha_n}^{t \leq \beta_n} (I_{n,c,t}^E \text{ ord}(t)) \leq \sum_{t \geq \alpha_m}^{t \leq \beta_m} (I_{m,c,t}^S \text{ ord}(t)) \quad (60)$$

$$\sum_{t \geq \alpha_m}^{t \leq \beta_m} (I_{m,c,t}^S \text{ ord}(t)) - \sum_{t \geq \alpha_n}^{t \leq \beta_n} (I_{n,c,t}^E \text{ ord}(t)) \leq T^{Gap} \quad (61)$$



$$UCL_{n,c,t} = \begin{cases} 1 - e^{-\kappa(T_n^{Prefer,s} - ord(t))} & , \alpha_n^U \leq t < \alpha_n^P \\ 1 & , \alpha_n^P \leq t \leq \beta_n^P \\ 1 - e^{-\kappa(ord(t) - T_n^{Prefer,e})} & , \beta_n^P < t < \beta_n^U \end{cases} \quad (62)$$

$$P_{c,t,s}^{PV} = \eta^{PV} G_{t,s} S_c \quad (63)$$

$$C_{c,t,s}^{Usage} = \lambda_{t,s}^{Energy} P_{c,t,s}^{Usage} \Delta t + \lambda^{EV} (P_{c,t,s}^{Ch,EV} + P_{c,t,s}^{Dch,EV}) \Delta t + \lambda^{EES} \sum_{e \in \Delta_c^e} (P_{e,t,s}^{Ch} + P_{e,t,s}^{Dch}) \Delta t \quad (64)$$

۹-۲- برنامه پاسخگویی تقاضای مبتنی بر قیمت

همانطور که پیشتر اشاره شد در مدل پیشنهادی فرض شده است که یک برنامه پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت بر روی واحدهای صنعتی بزرگ متصل به شبکه انتقال اعمال شده است [۲۱]. در این راستا معادله (۶۵) برای محاسبه تقاضای بار واحدهای صنعتی پس از مشارکت در برنامه پاسخگویی بار، داده شده است. قیود (۶۶) و (۶۷) نشان می‌دهند که مشارکت واحدهای صنعتی در برنامه پاسخگویی بار مقید به قیمت انرژی و میانگین آن، تقاضای بار ساعتی و درصدهای حداقل و حداکثر تغییر بار، بستگی دارد. قید (۶۸) نشان می‌دهد که افزایش و کاهش همزمان تقاضا مجاز نمی‌باشد. در نهایت قید (۶۹) از حذف/افزایش بار واحدهای صنعتی در دوره بهره‌برداری جلوگیری می‌کند.

$$P_{i,t,s}^{Load} = P_{i,t,s}^{Load,Base} + P_{i,t,s}^{DR+} - P_{i,t,s}^{DR-}, \quad i \in \Delta_{ind}^i \quad (65)$$

$$\gamma_{min}^{DR} P_{i,t,s}^{Load,Base} \left(1 - \frac{\lambda_{t,s}^{Energy}}{\lambda_{avg}^{Energy}} \right) \leq P_{c,t,s}^{DR+} \leq \gamma_{max}^{DR} P_{i,t,s}^{Load,Base} I_{i,t,s}^{DR+}, \quad i \in \Delta_{ind}^i \quad (66)$$

$$\gamma_{min}^{DR} P_{i,t,s}^{Load,Base} \left(\frac{\lambda_{t,s}^{Energy}}{\lambda_{avg}^{Energy}} - 1 \right) \leq P_{c,t,s}^{DR-} \leq \gamma_{max}^{DR} P_{i,t,s}^{Load,Base} I_{i,t,s}^{DR-}, \quad i \in \Delta_{ind}^i \quad (67)$$

$$I_{c,t,s}^{DR+} + I_{c,t,s}^{DR-} \leq 1, \quad i \in \Delta_{ind}^i \quad (68)$$

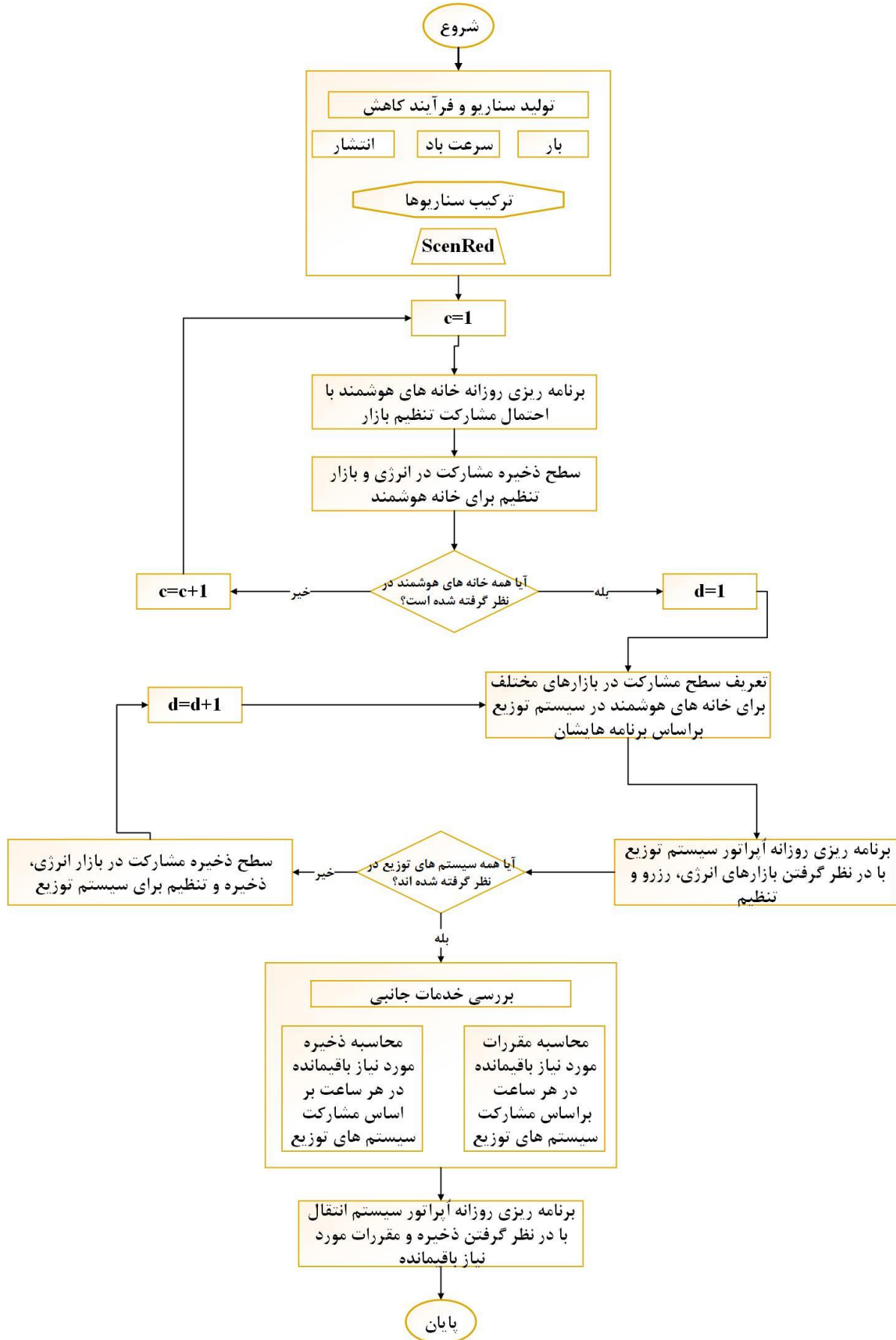
$$\sum_i (P_{i,t,s}^{DR+} - P_{i,t,s}^{DR-}) = 0, \quad i \in \Delta_{ind}^i \quad (69)$$

۳- روش اجرای مدل سه سطحی پیشنهادی

فلوچارت ارائه شده در شکل (۱) مراحل اجرای مدل سه سطحی پیشنهادی را نشان می‌دهد. در گام اول، سناریوهای مورد نیاز برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار، باد و تابش به ترتیب توسط توابع توزیع احتمالاتی نرمال^{۲۷}، ویبول^{۲۸} و بتا^{۲۹} تشکیل می‌شوند. توجه شود که تعداد سناریوهای اولیه، ۱۰۰۰ عدد برای هر پارامتر می‌باشد. سپس این سناریوها به توسط ابزار SCENRED در نرم‌افزار گمز داده شده تا تعداد آن‌ها به ۱۰ سناریو برای هر پارامتر کاهش داده شده و حجم محاسبات تقلیل یابد. سناریوهای نهایی به عنوان پارامترهای ورودی به GAMS داده شده تا مدل سه سطحی پیشنهادی حل شود. همانطور که فلوچارت نشان می‌دهد در سطح اول مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی روزانه خانه‌های هوشمند با امکان مشارکت آن‌ها در بازارهای تنظیم بالا و پایین و با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها انجام می‌شود. سپس برنامه این خانه‌ها به سطح سوم منتقل شده تا بهره‌برداران سیستم‌های توزیع برنامه‌ریزی روزانه خود را با توجه به آن‌ها انجام دهند. توجه شود که هدف سیستم‌های توزیع حداقل‌سازی هزینه‌های روزانه خود با امکان مشارکت همزمان در بازارهای انرژی، رزرو و تنظیم می‌باشد. در نهایت، بهره‌بردار سیستم انتقال برنامه‌های سیستم‌های توزیع را دریافت کرده و برنامه‌ریزی خود را با توجه به آن‌ها و با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های روزانه انجام می‌دهند. لازم به ذکر می‌باشد که خروجی اصلی این شبیه‌سازی برنامه مشارکت هر نهاد در بازارهای انرژی، رزرو و تنظیم می‌باشد.



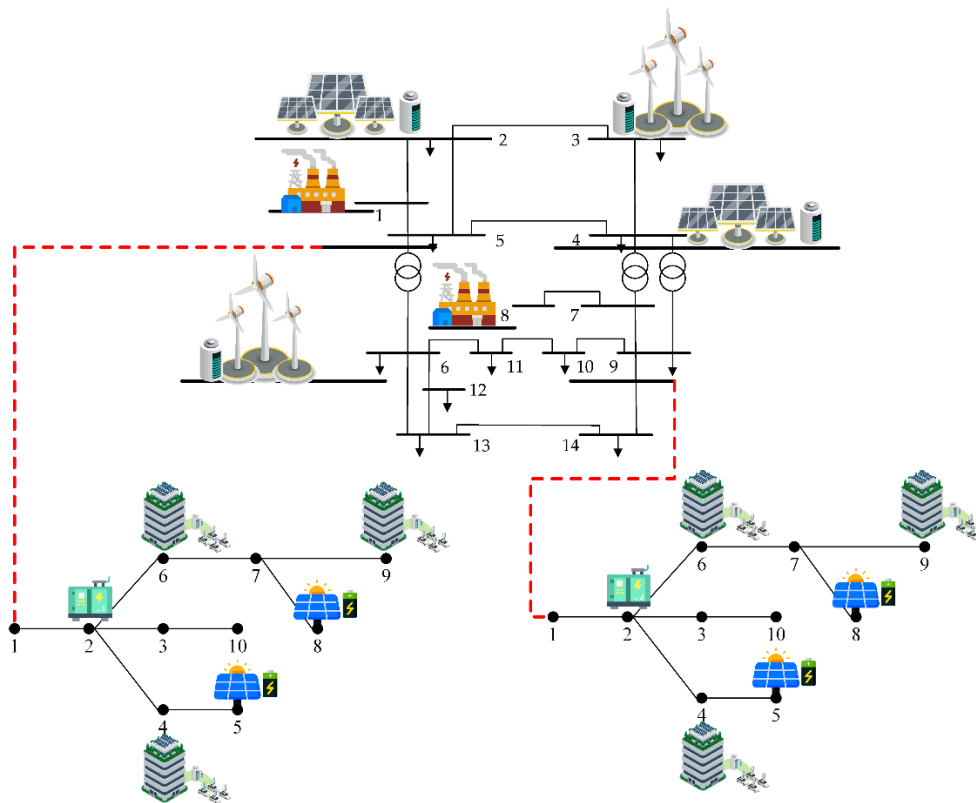
شکل (۱): فلوجارت تبیین کننده مراحل اجرای مدل سه سطحی پیشنهادی



۴- شبیه‌سازی مدل پیشنهادی

۴-۱- شبکه تحت مطالعه

نمای کلی سیستم تحت مطالعه که مدل پیشنهادی بر روی آن اجرا می‌شود را در شکل (۲) می‌توان دید. این سیستم متشکل از یک شبکه انتقال ۱۴ شینه متصل به دو سیستم توزیع ۱۰ شینه می‌باشد. مطابق این نمای کلی، واحدهای حرارتی و مزارع بادی مجهز به سیستم‌های ذخیره‌ساز بر روی شبکه انتقال قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، دو بار صنعتی به شین‌های ۳ و ۴ شبکه انتقال متصل می‌باشند. همانطور که از نمای کلی می‌توان دید، سیستم‌های توزیع متشکل از توربین‌های گازی و پنل‌های خورشیدی مجهز به سیستم‌های ذخیره‌ساز می‌باشند. لازم به ذکر می‌باشد که توربین‌های گازی در این مطالعه بر اساس مالکیت آن‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند: الف) توربین‌های گازی تحت مالکیت سیستم‌های توزیع، ب) توربین‌های گازی با مالکیت خصوصی می‌باشند. لازم به ذکر است که هزینه تولید توان توسط توربین‌های گازی خصوصی بسیار بالاتر از توربین‌های تحت مالکیت شبکه می‌باشد. بار شبکه‌های توزیع شامل مصرف‌کنندگان هوشمند و معمولی می‌باشد. لازم به ذکر است که وسایل خانه‌های هوشمند توسط مکانیزم اینترنت اشیا قابل کنترل می‌باشند. در انتها باید ذکر شود که خانه‌های هوشمند دارای خودروهای الکتریکی می‌باشد که از پتانسیل آن برای مشارکت بالاتر در بازارهای تنظیم بالا و پایین استفاده می‌کنند.



شکل (۲): توپولوژی شبکه‌های انتقال و توزیع تحت مطالعه در این مقاله

۴-۲- موارد مطالعاتی و اطلاعات ورودی شبیه‌سازی

چارچوب سه سطحی پیشنهادی در پنج مورد مطالعاتی حل خواهد شد تا تأثیرگذاری آن در شرایط بهره‌برداری مختلف ارزیابی شود. جزئیات موارد مطالعاتی به شرح زیر می‌باشند:

- مورد مطالعاتی ۱: تنها منابع درون شبکه انتقال تأمین‌کنندگان بازارهای تنظیم و رزرو می‌باشند.
- مورد مطالعاتی ۲: منابع تولید پراکنده درون سیستم‌های توزیع در بازار رزرو مشارکت می‌کنند.
- مورد مطالعاتی ۳: منابع تولید پراکنده درون سیستم‌های توزیع در بازارهای تنظیم و رزرو مشارکت می‌کنند.
- مورد مطالعاتی ۴: خانه‌های هوشمند و منابع تولید پراکنده درون سیستم‌های توزیع در بازارهای تنظیم و رزرو مشارکت می‌کنند.
- مورد مطالعاتی ۵: یک برنامه پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت بر روی بارهای صنعتی شبکه انتقال اجرا می‌شود.

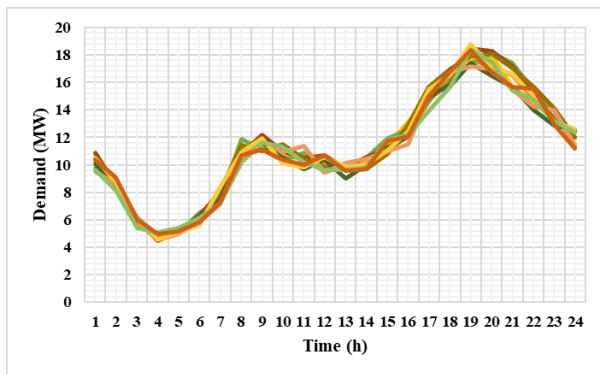
سناریوهای تقاضای بار مرتبط با سیستم انتقال، سیستم‌های توزیع و خانه‌های هوشمند در شکل‌های (۳، الف) تا (۳، د) نشان داده شده‌اند. شکل‌های (۴، الف) و (۴، ب) سناریوهای مرتبط به تقاضاهای تنظیم و رزرو را ارائه داده، درحالی که شکل‌های (۴، ج) و (۴، د) سناریوهای مرتبط با سرعت باد و تابش را نشان می‌دهند. در جدول (۳) اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی داده شده و در جدول (۴) اطلاعات مورد نیاز برای بهره‌برداری از تجهیزات قابل کنترل خانه‌های هوشمند ارائه می‌شوند.

جدول (۳): مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی [۲۳]

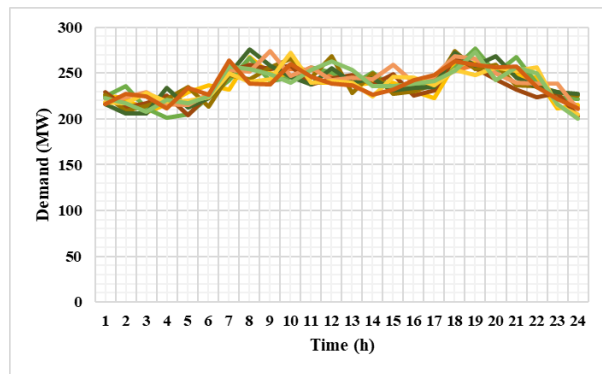
پارامترها	η^{Ch}	η^{Dch}	$E_e^{initial}$	$P_e^{Ch,Max}$	$P_e^{Dch,Max}$	η^G	E_e^{min}	E_e^{max}
مقادیر	۹۵ درصد	۹۵ درصد	۵۰ درصد	۴۰ درصد	۴۰ درصد	۶۰ درصد	۳۰ درصد	۹۵ درصد
پارامترها	v_i	v_r	v_o	V^{Min}	V^{Max}	η^{PV}	G_{stc}	M^G
مقادیر	۵ (m/s)	۱۰ (m/s)	۱۷ (m/s)	۰/۹ (pu)	۱/۱ (pu)	۹۵ درصد	۱۰۰۰ (W / m^2)	۰/۸۲۹ (kg / m^3)

جدول (۴): اطلاعات مورد نیاز برای بهره‌برداری از تجهیزات قابل کنترل خانه‌های هوشمند [۲۵]

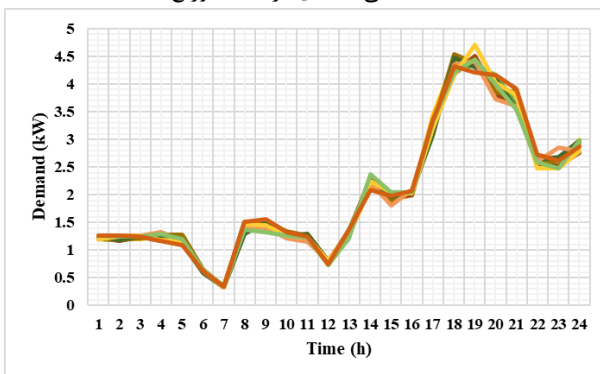
تجهیزات	بازه بهره‌برداری		دوره فعالیت	انرژی مورد نیاز (kWh)
	ساعت شروع	ساعت پایان		
غذاساز	۱۰:۰۰	۱۵:۰۰	۲	۰/۶
توستر	۶:۰۰	۱۰:۰۰	۱	۰/۸
خشک‌کن لباس	۱۱:۰۰	۲۲:۰۰	۱	۱/۸
ماشین ظرفشویی	۱۲:۰۰	۲۲:۰۰	۲	۱/۴
کتری برقی	۶:۰۰	۱۰:۰۰	۱	۱
اتو	۵:۰۰	۹:۰۰	۱	۱/۱
ماشین لباسشویی	۹:۰۰	۱۷:۰۰	۲	۱
مایکروویو	۱۱:۰۰	۲۲:۰۰	۲	۱/۸
جاروبرقی	۹:۰۰	۱۹:۰۰	۱	۰/۶۵



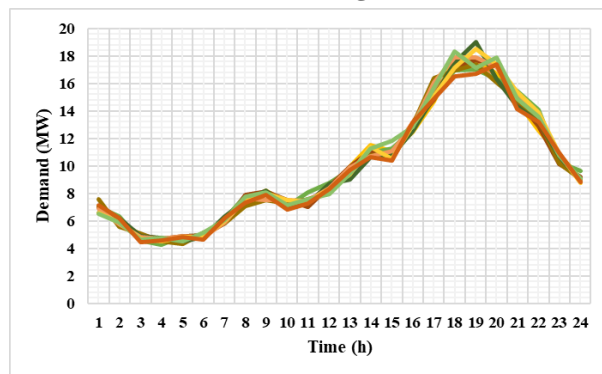
(ب): منحنی تقاضای بار شبکه توزیع ۱



(الف): منحنی تقاضای بار شبکه انتقال

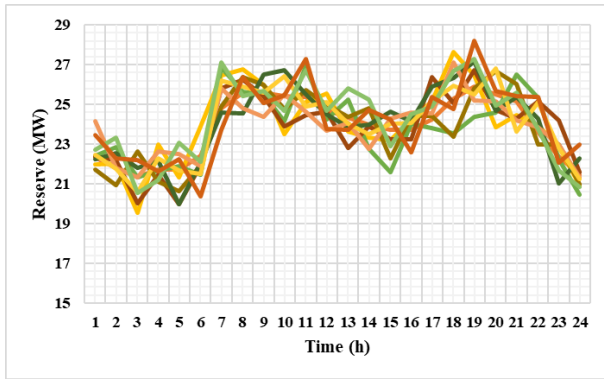


(د): منحنی تقاضای بار خانه‌های هوشمند

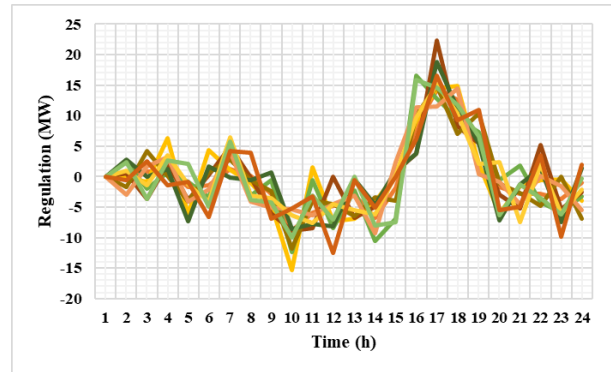


(ج): منحنی تقاضای بار شبکه توزیع ۲

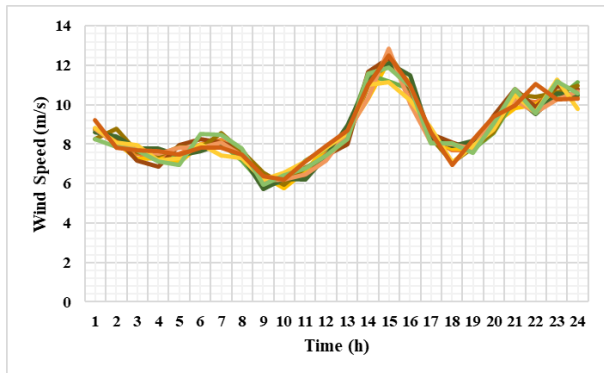
شکل (۲): سناریوهای مربوط به تقاضای بار



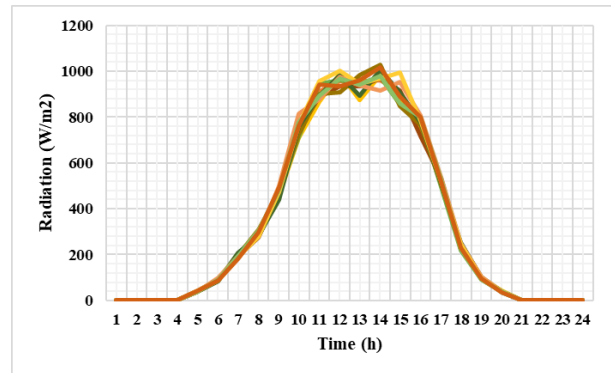
(ب): تقاضای ظرفیت‌های رزرو



(الف): تقاضای ظرفیت‌های تنظیم



(د): باد



(ج): تابش

شکل (۳): سناریوهای مربوط به تقاضای ظرفیت‌های تنظیم و رزرو، تابش و سرعت باد

۴-۳- نتایج شبیه‌سازی

در این زیر بخش نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی موارد مطالعاتی ارائه می‌شوند. در مورد مطالعاتی اول تنها سیستم انتقال تأمین‌کننده ظرفیت‌های رزرو است، در حالی که در مورد مطالعاتی دوم واحدهای تولیدی و سیستم‌های ذخیره‌ساز قرار گرفته بر روی سیستم‌های توزیع نیز علاوه بر واحدهای حرارتی سیستم انتقال، تأمین‌کننده ظرفیت‌های رزرو می‌باشند. نتایج عددی ارائه شده در جداول (۵) و (۶) نشان می‌دهند که مشارکت واحدهای تولیدی قرار گرفته در سیستم‌های توزیع در بازار رزرو منجر به کاهش مجموع هزینه‌های این بازار در مورد مطالعاتی دوم شده است. دلیل این کاهش هزینه، قیمت حاشیه‌ای پایین‌تر توربین‌های گازی قرار گرفته در سیستم توزیع در مقایسه با واحدهای حرارتی قرار گرفته در سیستم انتقال می‌باشد.

در شکل‌های (۵، الف) و (۵، ب) برنامه مشارکت سیستم انتقال در بازارهای انرژی و خدمات جانبی به تصویر کشیده شده که آنالیز آن منعکس‌کننده سهم کمتر واحدهای حرارتی قرار گرفته در سیستم انتقال در تأمین ظرفیت رزرو، در مورد دوم نسبت به مورد اول می‌باشد. نتایج جدول (۶) همچنین نشان می‌دهند که مشارکت توربین‌های گازی خصوصی در بازار رزرو منجر به افزایش سود آن‌ها در مقایسه با مورد اول شده است. در شکل‌های (۶، الف) تا (۶، د) برنامه مشارکت سیستم‌های توزیع در بازارهای انرژی و خدمات جانبی در مورد دوم نشان داده شده است. مطابق این شکل‌ها، توربین‌های گازی تحت مالکیت سیستم‌های توزیع در تمامی دوره بهره‌برداری به جز ساعات اولیه روز (بین ساعات ۱ تا ۵) که ظرفیت مازاد دارند، تمامی ظرفیت خود را به بازار انرژی اختصاص داده‌اند. همچنین این نکته را می‌تواند دید که این توربین‌ها در ساعات اولیه روز ظرفیت مازاد خود را به بازار رزرو اختصاص داده‌اند. در مقابل می‌توان دید که توربین‌های گازی با مالکیت خصوصی در تمامی دوره بهره‌برداری به جز دوره پیک که در بازار انرژی شرکت کرده‌اند، ظرفیت خود را به بازار رزرو اختصاص داده‌اند. لازم به ذکر می‌باشد که خرید توان از توربین‌های گازی خصوصی تنها در ساعات گران (بین ساعات ۱۷ تا ۲۲) برای بهره‌برداران سیستم‌های توزیع مقرون به صرفه می‌باشد در حالی که در سایر ساعات قیمت خرید توان از این توربین‌ها بالاتر از قیمت خرید توان از شبکه بالادست می‌باشد.

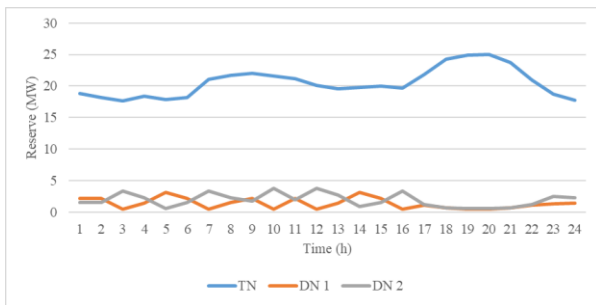


جدول (۵): نتایج عددی مورد مطالعاتی اول

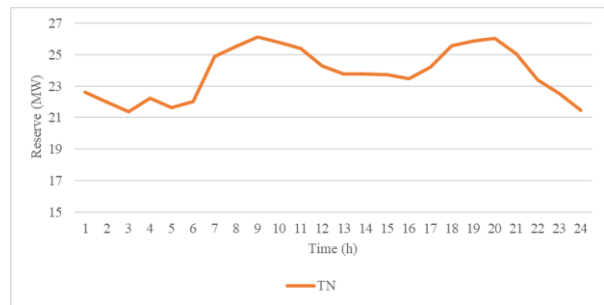
شبهه	هزینه‌های روزانه (دلار)					
	خانه‌های هوشمند	مجموع	توربین‌های گازی		بازارها	
			خصوصی	تنظیم	رزرو	انرژی
انتقال	-	۶۵۶۲۸/۷۹۲	-	۱۹۱۷/۷۴۴	۱۱۸۰/۹۲۸	۶۲۵۳۰/۱۲
توزیع ۱	۳۱۲۷/۷۲	۳۲۷۹/۱۲۸	۱۳۶/۵۶	-	-	۳۱۴۲/۵۶۸
توزیع ۲	۲۸۴۴/۱۲۸	۳۱۵۴/۰۲۷۲	۲۱۱/۵۷۶	-	-	۲۹۴۲/۴۵۱۲
مجموع	۵۹۷۱/۸۴۸	۷۲۰۶۱/۹۴۷۲	۳۴۸/۱۳۶	۱۹۱۷/۷۴۴	۱۱۸۰/۹۲۸	۶۸۶۱۵/۱۳۹۲

جدول (۶): نتایج عددی مورد مطالعاتی دوم

شبهه	هزینه‌های روزانه (دلار)					
	خانه‌های هوشمند	مجموع	توربین‌های گازی		بازارها	
			خصوصی	تنظیم	رزرو	انرژی
انتقال	-	۶۵۵۸۹/۲۴۳۲	-	۱۹۱۷/۷۴۴	۱۰۶۷/۳۴۷۲	۶۲۶۰۴/۱۵۲
توزیع ۱	۳۱۲۷/۷۲	۳۱۹۶/۸۸۸	۱۸۴/۶۴	۰	-۶۰/۱۷۶	۳۰۷۲/۴۲۴
توزیع ۲	۲۸۴۴/۱۲۸	۳۰۵۳/۴۹۹۲	۲۷۲/۶۹۶	۰	-۸۱/۸	۲۸۶۲/۶۰۳۲
مجموع	۵۹۷۱/۸۴۸	۷۱۸۳۹/۶۳۰۴	۴۵۷/۳۳۶	۱۹۱۷/۷۴۴	۹۲۵/۳۷۱۲	۶۸۵۳۹/۱۷۹۲

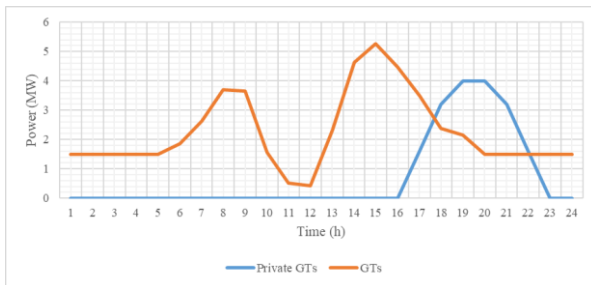


(ب): مورد دوم

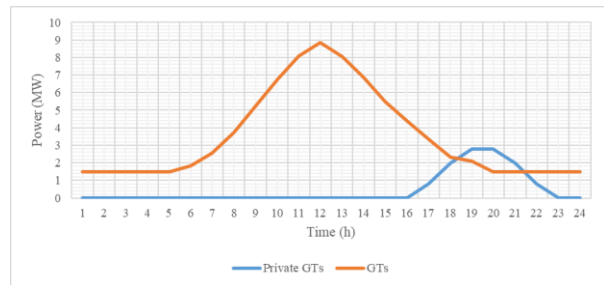


(الف): مورد اول

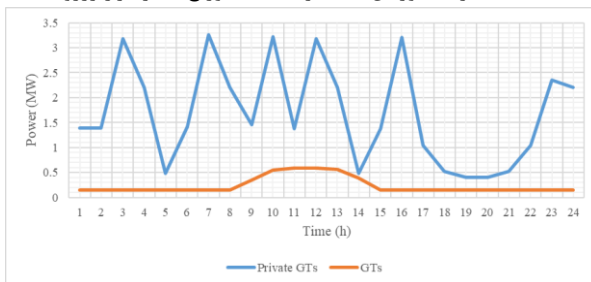
شکل (۵): تأمین‌کنندگان ظرفیت‌های رزرو در موردهای اول و دوم



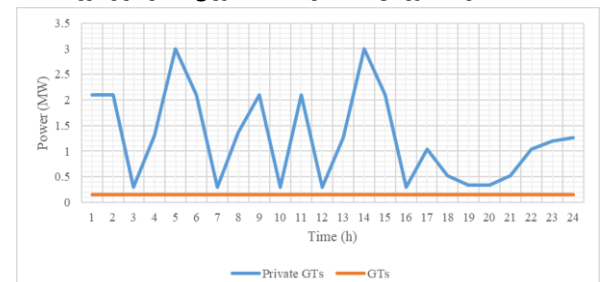
(ب): مشارکت توربین‌های گازی شبکه توزیع ۱ در بازار رزرو



(الف): مشارکت توربین‌های گازی شبکه توزیع ۱ در بازار انرژی



(د): مشارکت توربین‌های گازی شبکه توزیع ۱ در بازار رزرو



(ج): مشارکت توربین‌های گازی شبکه توزیع ۲ در بازار انرژی

شکل (۶): مشارکت توربین‌های گازی درون شبکه‌های توزیع در بازارهای انرژی و رزرو در مورد دوم



جدول (۷) نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی در مورد سوم را ارائه می‌کند. این مورد مشابه با مورد دوم بوده با این تفاوت که واحدهای تولیدی و سیستم‌های ذخیره‌ساز قرار گرفته در سیستم‌های توزیع نیز در بازار تنظیم مشارکت می‌کنند. نتایج جدول منعکس می‌کنند که مشارکت این منابع در بازار تنظیم مجموع هزینه‌های این بازار را کاهش داده که دلیل این امر قیمت حاشیه‌ای پایین‌تر این منابع در مقایسه با واحدهای حرارتی قرار گرفته در سیستم انتقال می‌باشد. نتایج عددی نشان می‌دهند که واحدهای تولیدی و سیستم‌های ذخیره‌ساز قرار گرفته در سیستم توزیع در بازار تنظیم نه تنها مجموع هزینه‌های ریزشکها را کاهش داده بلکه منجر به کاهش هزینه‌های سیستم انتقال شده است. توجه شود که دلیل کاهش هزینه‌های سیستم انتقال پایین‌تر بودن هزینه خرید ظرفیت تنظیم از سطح توزیع نسبت به خرید آن از واحدهای تولیدی در سطح انتقال می‌باشد.

نتایج جدول (۸) نشان می‌دهند که افزوده شدن خانه‌های هوشمند و خودروهای الکتریکی آن‌ها به تأمین‌کنندگان بازار تنظیم در مورد چهارم، هزینه‌های این بازار را نسبت به مورد سوم کاهش داده که دلیل این امر ارائه سرویس‌های تنظیم ارزان توسط این مشترکین می‌باشد. در این راستا، نتایج عددی نشان‌دهنده کاهش هزینه‌های روزانه خانه‌های هوشمند در مورد چهارم نسبت به مورد سوم می‌باشد که دلیل این امر کسب سود آن‌ها از بازار تنظیم می‌باشد. در شکل‌های (۷) تا (۸) برنامه مشارکت سیستم‌های توزیع در بازارهای رزرو و تنظیم در مورد سوم و چهارم نشان داده شده است. شکل‌های (۷، الف) تا (۷، د) برنامه‌های مشارکت منابع درون شبکه‌های توزیع را در بازار رزرو نشان می‌دهند. تجزیه و تحلیل این شکل‌ها نشان می‌دهد که بیشتر ظرفیت‌های رزرو مورد نیاز سیستم توسط توربین‌های گاز خصوصی تأمین می‌شود، زیرا توربین‌های گازی تحت مالکیت شبکه‌های توزیع بیشتر ظرفیت خود را به بازار انرژی اختصاص داده‌اند. لازم به ذکر است که بهره‌بردار شبکه‌های توزیع به دلیل قیمت ارزان‌تر ترجیح داده است که تقاضای انرژی را از طریق توربین‌های گازی خود به جای توربین‌های گاز خصوصی تأمین کند. از سوی دیگر، خروجی‌های ارائه شده در (۷، الف) تا (۷، د) نشان می‌دهد که مشارکت توربین‌های گازی در ساعات اوج مصرف به شدت کاهش یافته است که دلیل آن بالا بودن قیمت انرژی در این دوره و به دنبال آن ترجیح توربین‌های گازی برای حضور در بازار انرژی است.

مطابق شکل‌های (۸، الف) تا (۸، د)، خانه‌های هوشمند در دوره‌های پیک در بازار تنظیم بالا مشارکت کرده‌اند در حالی که در ساعات اولیه روز و همچنین ساعت انتهایی شب در بازار تنظیم پایین مشارکت کرده‌اند. این نکته قابل ذکر می‌باشد که انعطاف بالای خانه‌های هوشمند برای مشارکت در بازارهای تنظیم بالا و پایین به دلیل مجهز بودن به تجهیزات کنترل‌پذیر، پنل‌های خورشیدی، سیستم‌های ذخیره‌ساز و خودروهای الکتریکی می‌باشد.

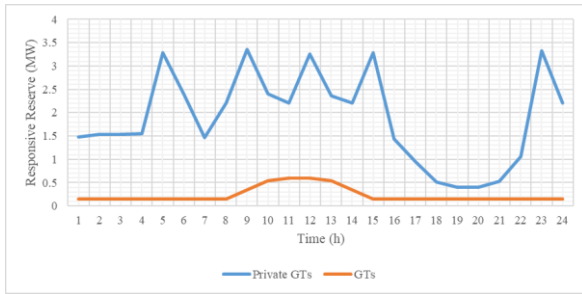
جدول (۷): نتایج عددی مورد مطالعاتی سوم

هزینه‌های روزانه (دلار)						
خانه‌های هوشمند	مجموع	توربین‌های گازی خصوصی	بازارها		انرژی	شبکه
			تنظیم	رزرو		
-	۶۵۳۵۶/۱۰۹۶	-	۱۶۹۱/۱۶۴۸	۱۰۷۱/۰۲۰۸	۶۲۵۹۴/۶۲۴	انتقال
۳۱۲۷/۷۲	۳۰۶۰/۹۰۲۴	۲۲۰/۰۷۲	-۱۵۶/۱۰۴	-۴۷/۱۴۴	۳۰۴۴/۰۷۸۴	توزیع ۱
۲۸۴۴/۱۲	۲۹۳۴/۶۶۴	۳۵۶/۳۶	-۱۲۷/۱۲	-۹۰/۲۴	۲۷۹۵/۶۶۴	توزیع ۲
۵۹۷۱/۸۴	۷۱۳۵۲/۳۷۶	۵۷۶/۴۳۲	۱۴۰۷/۹۴۰۸	۹۳۳/۶۳۶۸	۶۸۴۳۴/۳۶۶۴	مجموع

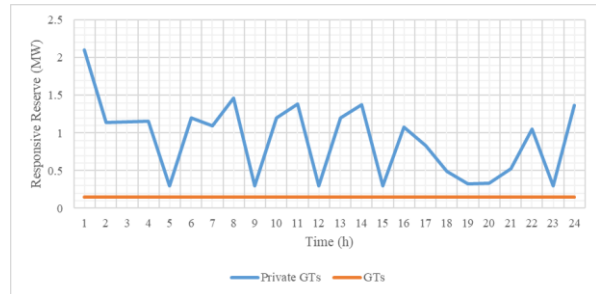
جدول (۸): نتایج عددی مورد مطالعاتی چهارم

هزینه‌های روزانه (دلار)						
خانه‌های هوشمند	مجموع	توربین‌های گازی خصوصی	بازارها		انرژی	شبکه
			تنظیم	رزرو		
-	۶۵۲۲۴/۹۵۳۶	-	۱۵۵۵/۰۴۳۲	۱۰۶۶/۰۲۲۴	۶۲۶۰۳/۱۸۸۸	انتقال
۲۹۰۹/۹۲۹۶	۲۷۱۷/۲۶۵۶	۱۹۹/۹۶۸	-۴۵۳/۳۷۶	-۵۳/۰۴۸	۳۰۲۳/۷۲۱۶	توزیع ۱
۲۶۲۶/۳۲۳۲	۲۶۳۰/۷۵۶۸	۳۰۹/۸۶۴	-۴۳۸/۷۹۲	-۹۰/۵۸۴	۲۸۵۰/۲۶۸۸	توزیع ۲
۵۵۳۶/۲۵۲۸	۷۰۵۷۲/۹۷۶	۵۰۹/۸۳۲	۶۶۲/۸۷۵۲	۹۲۲/۳۹۰۴	۶۸۴۷۷/۸۷۸۴	مجموع

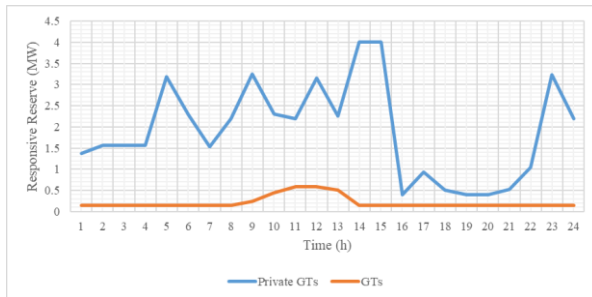




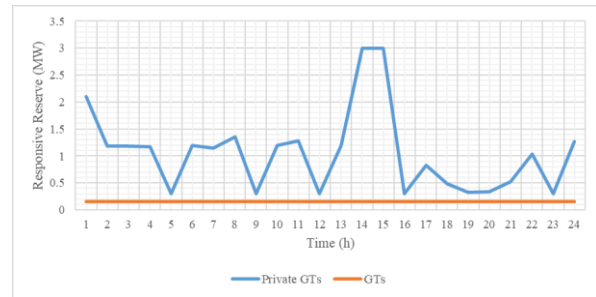
(ب) مشارکت شبکه توزیع ۱ در بازار رزرو در مورد چهارم



(الف) مشارکت شبکه توزیع ۱ در بازار رزرو در مورد سوم

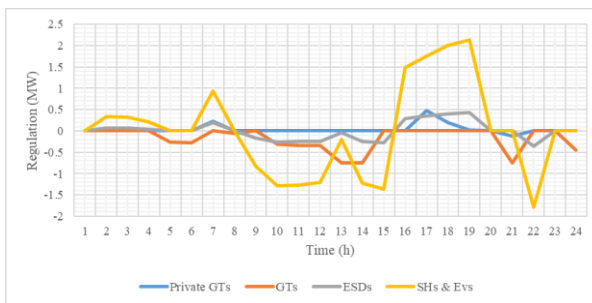


(د) مشارکت شبکه توزیع ۲ در بازار رزرو در مورد چهارم

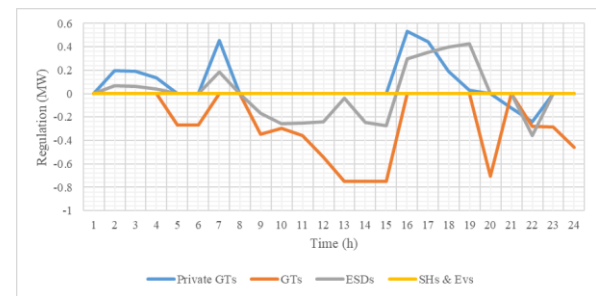


(ج) مشارکت شبکه توزیع ۲ در بازار رزرو در مورد سوم

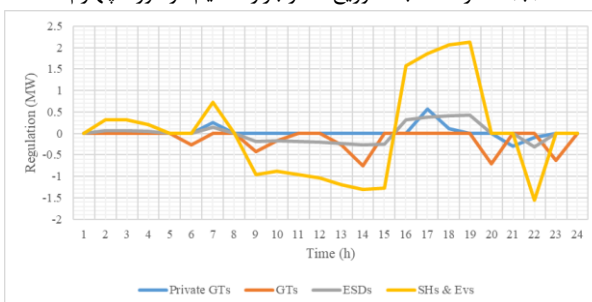
شکل (۷): مشارکت شبکه‌های توزیع در بازار رزرو



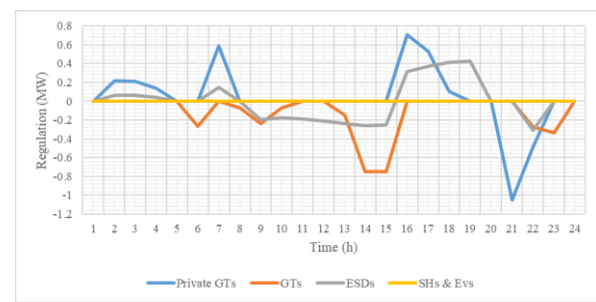
(ب) مشارکت شبکه توزیع ۱ در بازار تنظیم در مورد چهارم



(الف) مشارکت شبکه توزیع ۱ در بازار تنظیم در مورد سوم



(د) مشارکت شبکه توزیع ۲ در بازار تنظیم در مورد چهارم



(ج) مشارکت شبکه توزیع ۲ در بازار تنظیم در مورد سوم

شکل (۸): مشارکت شبکه‌های توزیع در بازار تنظیم

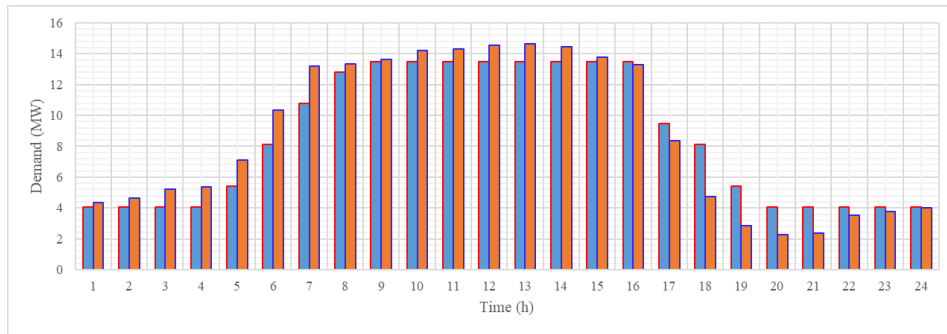
در مورد مطالعاتی پنجم یک برنامه پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت بر روی واحدهای بزرگ صنعتی متصل به سیستم انتقال اعمال شده تا تأثیر آن بر روی بازارهای انرژی و خدمات جانبی بررسی شود. نتایج این مورد در جدول (۹) ارائه شده که نشان‌دهنده تأثیر برنامه پاسخگویی بار بر روی کاهش هزینه‌ها در بازارهای انرژی، رزرو و تنظیم می‌باشند. دلیل این امر اصلاح منحنی تقاضای واحدهای صنعتی بزرگ می‌باشد. در شکل (۹) منحنی تقاضای بار صنعتی متصل به شین ۳ شبکه انتقال در موردهای چهارم و پنجم مقایسه شده تا تأثیر اعمال برنامه پاسخگویی بار بر روی آن ارزیابی شود. این شکل آشکار می‌کند که واحدهای صنعتی عکس‌العمل مناسبی به سیگنال قیمتی داشته چنانچه که بخش قابل توجهی از بار خود را از دوره پیک به دوره دره انتقال داده است. این موضوع منجر به پایین آمدن نقطه کار واحدهای حرارتی قرار گرفته در سیستم انتقال در دوره پیک شده و در نتیجه هزینه‌های بازارهای انرژی و خدمات جانبی



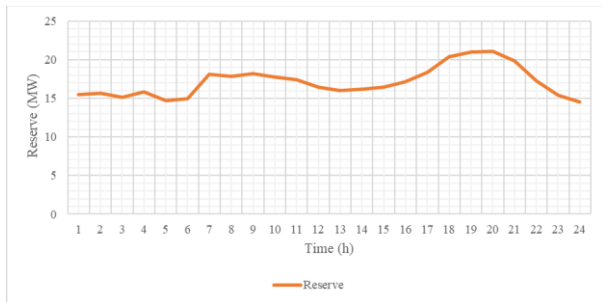
کاهش می‌یابد. در شکل‌های (۱۰، الف) تا (۱۰، د) میزان مشارکت واحدهای حرارتی قرار گرفته در سیستم انتقال در موردهای چهارم و پنجم مقایسه شده که ارزیابی آن‌ها نشان‌دهنده مشارکت کمتر این واحدها در هر سه بازار انرژی، رزرو و تنظیم در مورد مطالعاتی پنجم می‌باشد. در نهایت شکل (۱۱) سطح ولتاژ سیستم انتقال در ساعت پیک در موارد مطالعاتی چهارم و پنجم نشان می‌دهد که از آن می‌توان فهمید اجرای برنامه پاسخگویی بار به وضوح منجر به بهبود سطح ولتاژ سیستم انتقال به ویژه در شین‌های متصل به بارهای صنعتی شده است. به طور کلی نتایج به دست آمده از مورد مطالعاتی پنجم اثبات می‌کنند که اصلاح منحنی تقاضای بارهای بزرگ از طریق برنامه پاسخگویی بار، فواید فنی و اقتصادی قابل توجهی را برای سیستم به ارمغان می‌آورد.

جدول (۹): نتایج عددی مورد مطالعاتی پنجم

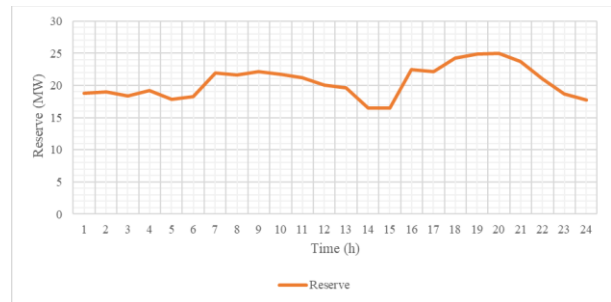
خانه‌های هوشمند	مجموع	توربین‌های گازی خصوصی	هزینه‌های روزانه (دلار)			شبکه
			بازارها		تنظیم	
			رزرو	انرژی		
-	۶۳۴۶۸/۶۵۹۲	-	۱۲۷۰/۶۱۱۲	۸۹۴/۲۸۸	۶۱۳۰۳/۷۶	انتقال
۲۸۴۸/۰۰۱۶	۲۶۶۶/۰۸۳۲	۲۱۲/۲۱۶	-۴۴۹/۳۳۶	-۴۷/۱۷۶	۲۹۵۰۳/۷۹۲	توزیع ۱
۲۵۷۲/۹۲۳۲	۲۵۶۸/۶۲۸۸	۳۲۸/۰۲۴	-۴۳۰/۹۵۲	-۸۹/۷۰۴	۲۷۶۱/۲۶۰۸	توزیع ۲
۵۴۲۰/۹۲۴۸	۶۸۷۰۳/۳۷۱۲	۵۴۰/۲۴	۳۹۰/۳۲۳۲	۷۵۷/۴۰۸	۶۷۰۱۵/۴	مجموع



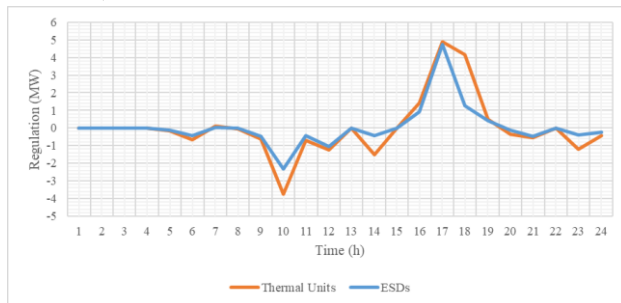
شکل (۹): منحنی تقاضای بار صنعتی متصل به شین چهارم، قبل و بعد از اجرای DRP



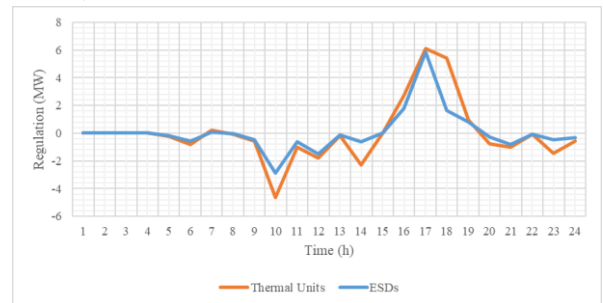
(ب): مشارکت شبکه انتقال در بازار رزرو در مورد پنجم



(الف): مشارکت شبکه انتقال در بازار رزرو در مورد چهارم



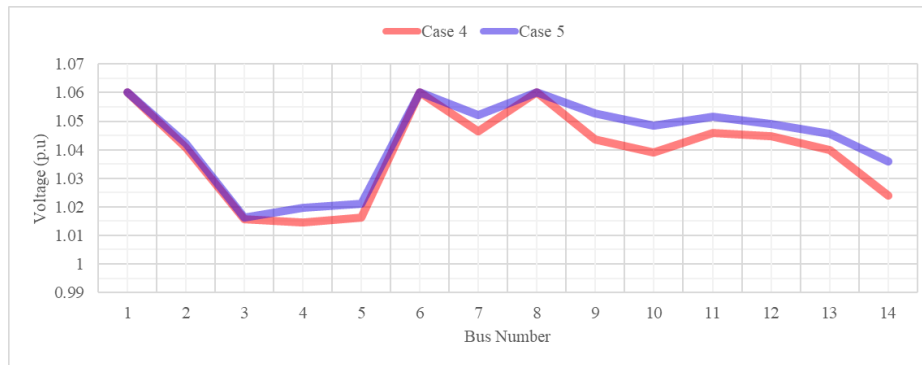
(د): مشارکت شبکه انتقال در بازار تنظیم در مورد پنجم



(ج): مشارکت شبکه انتقال در بازار تنظیم در مورد چهارم

شکل (۱۰): مشارکت شبکه انتقال در بازارهای رزرو و تنظیم





شکل (۱۱): سطح ولتاژ شبکه انتقال در ساعات پیک بار

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل سه سطحی برای مدیریت بازارهای انرژی و خدمات جانبی میان شبکه‌های انتقال و توزیع ارائه شد، که در آن برای مقابله با عدم قطعیت‌های مرتبط با تولید و مصرف از روش تصادفی مبتنی بر سناریو استفاده گردید. در مدل پیشنهادی، برنامه‌ریزی نهایی سیستم با در نظر گرفتن برنامه‌های بهینه شبکه‌های توزیع و خانه‌های هوشمند انجام گرفت جایی که منابع مختلف سطح توزیع قادر به مشارکت در بازارهای انرژی، رزرو و تنظیم بودند. مدل پیشنهادی تحت شرایط بهره‌برداری مختلف حل شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آشکار کردند که مشارکت سیستم‌های توزیع در بازار رزرو منجر به کاهش هزینه‌های روزانه این بازار شد. علاوه بر این نتایج منعکس کردند که مشارکت واحدهای تولیدی و سیستم‌های ذخیره‌ساز قرار گرفته در سطح توزیع در بازار تنظیم هزینه‌های روزانه این بازار را کاهش داد. مسئله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مشارکت خانه‌های هوشمند و خودروهای الکتریکی آن‌ها در بازار تنظیم حل شد که نتایج منعکس‌کننده کاهش قابل توجه هزینه‌های این بازار به دلیل ارائه سرویس‌های تنظیم ارزانتر توسط مشترکین مذکور بودند. در انتها، مسئله با در نظر گرفتن مشارکت واحدهای صنعتی بزرگ در یک برنامه پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت حل شد که نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه این برنامه‌ها بر ارتقای شاخص‌های فنی و اقتصادی شبکه بود به طوریکه هزینه‌های بازارهای انرژی و خدمات جانبی کاهش یافت در حالی که سطح ولتاژ افزایش یافت.

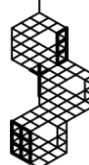
تجزیه و تحلیل مدل پیشنهادی در این مقاله قدرت بالای آن را در بهره‌گیری از پتانسیل خانه‌های هوشمند، خودروهای الکتریکی، سیستم‌های ذخیره‌ساز، برنامه پاسخگویی بار و منابع تولید پراکنده جهت مدیریت بهینه بازارهای انرژی و خدمات جانبی نشان داد. از نقاط قوت این مدل مدلسازی چند سطحی بازار می‌باشد که به هر مشارکت‌کننده اجازه برنامه‌ریزی غیرمتمرکز را می‌دهد. همچنین این مدل چند سطحی خطی بوده و به طور قابل توجهی حجم محاسبات را پایین می‌آورد. به طور کلی، مدل پیشنهادی در این مقاله توانسته بخشی از شکاف تحقیقاتی در زمینه بررسی تأثیرات خودروهای الکتریکی و مشترکین هوشمند بر بازارهای انرژی و خدمات جانبی میان سیستم‌های انتقال و توزیع را پوشش دهد. به طور ویژه، مدل پیشنهادی در این مقاله امکان بررسی رفتار بازیگران هوشمند سمت تقاضا را بر بازارهای رقابتی می‌دهد.

مراجع

- [1] K. Sevdari, L. Calearo, P.B. Andersen, M. Marinelli, "Ancillary services and electric vehicles: An overview from charging clusters and chargers technology perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167, pp. 112666, Oct 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112666.
- [2] S. Impram, S. Varbak Nese, B Oral, "Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey," *Energy Strategy Reviews*, vol. 31, pp. 100539, Sep 2020, doi: 10.1016/j.esr.2020.100539.
- [3] N. Martin, J. Rice, "Power outages, climate events and renewable energy: Reviewing energy storage policy and regulatory options for Australia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, pp. 110617, March 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110617.



- [4] M. Hamwi, I. Lizarralde, J. Legardeur, "Demand response business model canvas: A tool for flexibility creation in the electricity markets," *Journal of Cleaner Production*, vol. 282, pp. 124539, Feb 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124539.
- [5] S. Rivera S, Kouro, S. Vazquez, S.M. Goetz, R. Lizana, E. Romero-Cadaval, "Electric Vehicle Charging Infrastructure: From Grid to Battery," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 15, pp. 37-51, June 2021, doi: 10.1109/MIE.2020.3039039.
- [6] T. Jiang, C. Wu, R. Zhang, X. Li, H. Chen, G. Li, "Flexibility Clearing in Joint Energy and Flexibility Markets Considering TSO-DSO Coordination," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 14, pp. 1376-1387, Mar 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3153634.
- [7] M. Habibi, V. Vahidinasab, M.S. Sepasian, "A privacy-preserving approach to day-ahead TSO-DSO coordinated stochastic scheduling for energy and reserve," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 16, pp. 163-180, Jan 2022, doi: 10.1049/gtd2.12286.
- [8] S.I. Vagropoulos, P.N. Biskas, A.G. Bakirtzis, "Market-based TSO-DSO coordination for enhanced flexibility services provision," *Electric Power Systems Research*, vol. 208, pp. 10883, July 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.107883.
- [9] H. Chen, D. Wang, R. Zhang, T. Jiang, X. Li, "Optimal participation of ADN in energy and reserve markets considering TSO-DSO interface and DERs uncertainties," *Applied Energy*, vol. 308, pp. 118319, Feb 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118319.
- [10] L. Wang, J. Kwon, N. Schulz, Z. Zhou, "Evaluation of Aggregated EV Flexibility With TSO-DSO Coordination," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 13, pp. 2304-2315, Oct 2022, doi: 10.1109/TSST.2022.3190199.
- [11] Z. Shen, M. Liu, L. Xu, W. Lu, "Coordinated scheduling of integrated transmission and distribution systems using an improved Lipschitz dynamic programming approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 140, pp. 108076, Sep 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108076.
- [12] L. Marques, A. Sanjab, Y. Mou, H.L. Cadre, K. Kessels, "Grid Impact Aware TSO-DSO Market Models for Flexibility Procurement: Coordination, Pricing Efficiency, and Information Sharing," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, pp. 1920-1933, June 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3185460.
- [13] Y. Ruwaida, J.P. Chaves-Avila, N. Etherden, I. Gomez-Arriola, G. Gürses-Tran, K. Kessels, C. Madina, A. Sanjab, M. Santos-Mugica, D.N. Trakas, M. Tronica, "TSO-DSO-Customer coordination for purchasing flexibility system services: Challenges and lessons learned from a demonstration in Sweden," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, pp. 1883-1895, July 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3188261.
- [14] V.Z. Gjorgievski, N. Markovska, A. Abazi, N. Duić, "The potential of power-to-heat demand response to improve the flexibility of the energy system: An empirical review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, pp. 110489, March 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110489.
- [15] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, M.S. Javadi, A.E. Nezhad, M. Shafie-Khah, J.P.S. Catalão, "Chapter 9 - Demand response role for enhancing the flexibility of local energy systems," *Distributed Energy Resources in Local Integrated Energy Systems*, pp. 279-313, 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-823899-8.00011-X.
- [16] M.J. Rana, K.H. Rahi, T. Ray, R. Sarker, "An efficient optimization approach for flexibility provisioning in community microgrids with an incentive-based demand response scheme," *Sustainable Cities and Society*, vol. 74, pp. 103218, Nov 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.103218.
- [17] T. Cheng, Z. Tan, H. Zhong, "Exploiting Flexibility of Integrated Demand Response to Alleviate Power Flow Violation during Line Tripping Contingency," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, pp. 1-11, Feb 2022, doi:10.35833/MPCE.2021.000535.



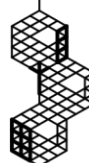
- [18] R. Ansari pour, H. Barati, A. Ghasemi, "A chance-constrained optimization framework for transmission congestion management and frequency regulation in the presence of wind farms and energy storage systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 213, pp. 108712, Dec 2022, doi:10.1016/j.epsr.2022.108712.
- [19] R. Ansari pour, H. Barati, A. Ghasemi, "Multi-objective chance-constrained transmission congestion management through optimal allocation of energy storage systems and TCSC devices," *Electrical Engineering*, vol. 104, pp. 4049-4069, July 2022, doi: 10.1007/s00202-022-01599-0.
- [20] Y. Chen, P. Xu, J. Gu, F. Schmidt, W. Li, "Measures to improve energy demand flexibility in buildings for demand response (DR): A review," *Energy and Buildings*, vol. 177, pp. 125-139, Oct 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.08.003.
- [21] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, E. Nematbakhsh, M.S. Javadi, A.R. Jordehi, J.P.S. Catalão, "Energy Management in Microgrids including Smart Homes: A Multi-objective Approach," *Sustainable Cities and Society*, vol. 69, pp. 102852, June 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.102852.
- [22] S.A. Mansouri, A. Rezaee Jordehi, M. Marzband, M. Tostado-Véliz, F. Jurado, J.A. Aguado, "An IoT-enabled hierarchical decentralized framework for multi-energy microgrids market management in the presence of smart prosumers using a deep learning-based forecaster," *Applied Energy*, vol. 333, pp. 120560, March 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120560.
- [23] S.A. Mansouri, E. Nematbakhsh, A.R. Jordehi, M. Marzband, M. Tostado-Véliz, F. Jurado, "An interval-based nested optimization framework for deriving flexibility from smart buildings and electric vehicle fleets in the TSO-DSO coordination," *Applied Energy*, vol. 341, pp. 121062, July 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121062.
- [24] A. Maneesha, K.S. Swarup, "Stochastic Optimal Bidding Strategy for Energy and Ancillary Services in Microgrid," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, pp. 5698-5705, Dec 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3112936.
- [25] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, E. Nematbakhsh, M.S. Javadi, A. Esmael Nezhad, J.P.S. Catalão, "A sustainable framework for multi-microgrids energy management in automated distribution network by considering smart homes and high penetration of renewable energy resources," *Energy*, vol. 245, pp. 123228, April 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123228.
- [26] S.A. Mansouri, E. Nematbakhsh, A.R. Jordehi, M. Tostado-Véliz, F. Jurado, Z. Leonowicz, "A Risk-Based Bi-Level Bidding System to Manage Day-Ahead Electricity Market and Scheduling of Interconnected Microgrids in the presence of Smart Homes," *2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, pp. 1-6, July 2022, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854685.
- [27] X. Wang, T. Zhao, A. Parisio, "Frequency regulation and congestion management by Virtual Storage Plants," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 29, pp. 100586, March 2022, doi: 10.1016/j.segan.2021.100586.
- [28] M. Roustaei, A. Letafat, M. Sheikh, A. Chabok, R. Sadoughi, M. Ardeshiri, "A cost-effective voltage security constrained congestion management approach for transmission system operation improvement," *Electric Power Systems Research*, vol. 203, pp. 107674, Feb 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107674.
- [29] N. Tarashandeh, A. Karimi, "Utilization of energy storage systems in congestion management of transmission networks with incentive-based approach for investors," *Journal of Energy Storage*, vol. 33, pp. 102034, Jan 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.102034.
- [30] K. Paul, "Modified grey wolf optimization approach for power system transmission line congestion management based on the influence of solar photovoltaic system," *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 13, pp. 751-767, Jan 2022, doi: 10.1007/s40095-021-00457-2.



- [31] A. Singh, A.K. Bohre, "Congestion Management of System with N-1 Contingency by Optimal Placement of TCSC Using PSO," *Advances in Energy Technology*, vol. 766, pp. 409–22, July 2021, doi: 10.1007/978-981-16-1476-7_38.
- [32] X. Wang, T. Xu, Y. Mu, Z. Wang, Y. Deng, T. Zhang, Q. Jiang, Y. Zhang, H. Jia, "Congestion management under peer-to-peer energy trading scheme among microgrids through cooperative game," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 59-66, April 2022, doi: 10.1016/j.egy.2021.11.130.
- [33] F. Samadi Gazijahani, A. Ghaemi, M. Farrokhifar, A. Safari, "Interactive FACTS and demand response program as an incremental welfare consensus for maximizing wind power penetration," *International transactions on electrical energy systems*, vol. 30, pp. e12526, July 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12526.
- [34] Á.S Xavier, F. Qiu, F. Wang, P.R. Thimmapuram, "Transmission Constraint Filtering in Large-Scale Security-Constrained Unit Commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol 34, pp. 2457-2460, May 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2892620.
- [35] B. Javanmard, M. Tabrizian, M. Ansarian, A. Ahmarinejad, "Energy management of multi-microgrids based on game theory approach in the presence of demand response programs, energy storage systems and renewable energy resources," *Journal of Energy Storage*, vol. 42, pp. 102971, Oct 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102971.
- [36] A.A. Safaie, M. Alizadeh Bidgoli, S. Javadi, "A multi-objective optimization framework for integrated electricity and natural gas networks considering smart homes in downward under uncertainties," *Energy*, vol. 239, pp. 122214, Jan 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122214.
- [37] Y Chen, A Casto, F Wang, Q Wang, X Wang, J Wan, "Improving Large Scale Day-Ahead Security Constrained Unit Commitment Performance," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 4732-4743, Nov 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2530811.

زیر نویس ها

-
- ¹ Electric vehicles
 - ² Demand-side management
 - ³ Vehicle-to-infrastructure
 - ⁴ Flexibility
 - ⁵ Locational marginal price
 - ⁶ Spinning reserve
 - ⁷ Data sharing
 - ⁸ Second-order cone programming
 - ⁹ Karush-Kuhn-Tucker (KKT)
 - ¹⁰ Ancillary services
 - ¹¹ Alternating direction method of multipliers
 - ¹² Final-users
 - ¹³ Congestion
 - ¹⁴ Demand response programs
 - ¹⁵ Peak period
 - ¹⁶ Thyristor-controlled series capacitor components
 - ¹⁷ Gray wolf
 - ¹⁸ Internet of things
 - ¹⁹ Peak-to-average ratio
 - ²⁰ Up and down regulation markets
 - ²¹ Vehicle-to-grid services
 - ²² Solar power plants
 - ²³ Solar power plants
 - ²⁴ Wind farms
 - ²⁵ Ramp





- ²⁶ Flag
- ²⁷ Normal
- ²⁸ Weibull
- ²⁹ Beta

