

Fall 2024, 5 (3), 141-156

Received: 1 Aug 2024

DOR:

Accepted: 14 Sep 2024

مقاله پژوهشی

Leveraging Electric Vehicles for Sustainable Energy Management in Smart Homes: A Communication-Centric Approach

Mahsa Maleki Jeyed¹, Mani Zarei^{2*}, Seyed Mahdi Jameii³

1. MSc Student, Computer Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
m_maleki_j@yahoo.com
2. Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*Corresponding Author, m.zarei@srbiau.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. sm.jameii@iau.ac.ir

Abstract

Introduction: The optimal and environmentally friendly generation of electricity is a critical challenge for modern society. Traditional methods rely solely on fossil fuels for residential power generation, leading to increased greenhouse gas emissions. This paper proposes a cost-effective approach for supplying electricity to smart homes, considering the initial charge level of the storage source and the impact of its availability on energy source pricing, including the power grid and renewable options.

Method: In this article a linear analytical model with boundary constraints and mixed-integer optimization variables is developed using the YALMIP toolbox in MATLAB. This model analyzes cost-effective electricity supply methods for smart homes.

Results: The results demonstrate that electric vehicles (EVs) can play a significant role in cost reduction when employed for energy buy-back under time-of-use tariffs. Simulations considering Iran's time-based electricity pricing structure reveal a 29.3% reduction in electricity costs when EVs are utilized for buying electricity during off-peak hours and supplying power during peak hours using vehicle-to-home (V2H) technology.

Discussion: Two case studies validate the effectiveness of the proposed model. The impact of renewable energy sources, grid electricity, storage batteries, and EVs on overall cost is evaluated under scenarios with and without mandatory renewable energy usage.

Keywords: Electric vehicle, Renewable resource, Smart home, Time-dependent variable tariff.

استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی برای مدیریت انرژی پایدار در خانه‌های هوشمند: یک رویکرد ارتباط محور

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴
دوره پنجم، پاییز ۱۴۰۳
شماره سوم، صص: ۱۴۱-۱۵۶

مهسا ملکی جید^۱، مانی زارعی^{۲*}، سیدمهدی جامعی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه کامپیوتر، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. m_maleki_j@yahoo.com
۲. استادیار، گروه کامپیوتر، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول) m.zareii@srbiau.ac.ir
۳. استادیار، گروه کامپیوتر، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. sm.jameii@iau.ac.ir

چکیده: تولید برق با روشی بهینه و کمترین میزان ایجاد مشکل برای طبیعت یکی از مهمترین مسائل جامعه بشری می‌باشد. خانه‌های هوشمند که جزوی از سیستم‌های هوشمند آتی محسوب می‌شوند دارای درک زیست محیطی بالایی از محیط پیرامون خود در چرخه دریافت و مصرف انرژی هستند. در این مقاله، راه‌های تأمین انرژی پایدار در خانه هوشمند با توجه به سطح شارژ اولیه منبع ذخیره‌ساز و تأثیر اهمیت آن بر روی قیمت منابع مختلف تأمین انرژی نظیر شبکه برق و منابع تجدیدپذیر به صورت ریاضی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین به روش تحلیلی، تأمین برق خانه هوشمند با بهره‌گیری از انرژی خودروی الکتریکی با قابلیت بازگشت انرژی به شبکه برق و با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری به صورت تعرفه ثابت و تعرفه زمان مصرف مطابق با آخرین تعرفه مصرفی کشور ایران مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از مدل تحلیلی خطی با قیود مرزی و متغیرهای بهینه‌سازی ساقه و ریشه مستخرج از جعبه ابزار YALMIP از نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد، خودروی الکتریکی در صورتی که تعرفه زمان مصرف اعمال شود، نقش مؤثری در فروش برق به روش بازگشت انرژی در ساعات اوج و یا ذخیره‌سازی آن در ساعات غیراوج دارد. کارایی مدل پیشنهادی با دو مورد مطالعاتی راستی‌آزمایی می‌شود و فاکتورهای میزان استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، شبکه توزیع، باتری ذخیره‌ساز و همچنین خودروی الکتریکی و با توجه به اجبار و یا عدم اجبار در استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا نقش این منابع در تأمین انرژی خانه‌های هوشمند روشن گردد.

واژه‌های کلیدی: خانه هوشمند، منابع تجدیدپذیر، خودروی الکتریکی، تعرفه زمان مصرف

۱. مقدمه

تولید برق با روشی بهینه و کمترین میزان ایجاد مشکل برای طبیعت یکی از مهمترین مسائل جامعه بشری می‌باشد. در روش سنتی صرفاً از سوخت‌های فسیلی برای تولید برق خانه مسکونی استفاده می‌شود. استفاده بیش از اندازه این نوع سوخت‌ها منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. از این رو، بهتر است روشی جایگزین گردد که تا حد امکان دوستدار طبیعت بوده و بازگشت انرژی داشته باشد. بنابراین منابع تجدیدپذیر بهترین راه حل است. خانه‌های هوشمند بخشی از کلان سیستم‌های هوشمند محسوب می‌شوند و فناوری پیشرفته‌ای دارند و دارای درک بالایی از جهان اطراف خود هستند [۱]. از مهمترین مزایای این سیستم‌ها بهینه‌سازی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، تأمین آسایش و رفاه، کنترل امنیت و ایمنی، کاهش هزینه‌ها، کنترل ساختمان از هر جای دنیا، کم کردن استهلاك وسایل مصرفی و قابلیت اطلاع‌رسانی آن‌ها می‌باشد. هدف اصلی در سیستم‌های هوشمند ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر باد، نور برای تولید انرژی است. از این رو مهمترین مسئله در مدیریت خانه‌های هوشمند در زمینه باهزینه انرژی مصرفی را می‌توان به با کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین خودروهای الکتریکی کنترل نمود. خودروهای الکتریکی هم که از یک منبع خارجی برق برای شارژ شدن استفاده می‌کنند نقش به سزایی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. بیشتر گازهای گلخانه‌ای را نیروگاه‌ها، صنایع و خودروها ایجاد می‌کنند، شش درصد این گازها نیز در پی گرمایش ساختمان‌ها به وجود می‌آیند. با توجه به استفاده از انرژی هوشمند، منابع انرژی تجدیدپذیر، خانه مسکونی و خودروی الکتریکی به عنوان آیتم‌های اصلی مورد بحث این تحقیق، باید در نظر گرفت که هر کدام از این آیتم‌ها دارای مزایا و معایبی هستند که می‌تواند به انجام این تحقیق کمک کند. پس با بررسی تحقیقات گذشته مرتبط با این موارد به جمع‌آوری اطلاعات دقیق‌تر پرداخته شده است.

فناوری شبکه هوشمند به عنوان یکی از راه‌حل‌های اصلی برای چندین سوال چالش برانگیز از شبکه برق فعلی در نظر گرفته شده است. این روش باعث کاهش چشمگیر در هزینه کل انرژی برای پرداخت شبکه هوشمند می‌شود [۲]. به دلیل برخی پارامترهای نامشخص این خودروها مانند حالت شارژ^۱ (SOC) باتری، در دسترس بودن خودروی الکتریکی و... رفتار تصادفی دارند و می‌تواند بر تسویه بازار انرژی تأثیر بگذارد [۳]. سیستم مدیریت انرژی خانگی^۲ (HEMS) یک راه‌حل مؤثر برای کمک به کاربران مسکونی در مقابله با پیچیدگی قیمت برق پویا ارائه می‌دهد. براساس خروجی پیش‌بینی شده انرژی خورشیدی و قیمت برق، یک مدل زمان‌بندی بهینه برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مورد عملیات منابع انرژی مسکونی^۳ (RES) پیشنهاد شده است [۴]. یک سیستم مدیریت انرژی مؤثر^۴ (EMS) برای کاربرد در ساختمان یکپارچه و سیستم میکروشبکه به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی

چندهدفه معرفی و اجرا شده است. معماری پیشنهادی جنبه‌های مختلف مدل‌سازی کلیدی مانند ویژگی‌های تولید حرارت و تولید برق، انتقال حرارت و پویایی حرارتی ساختمان‌های مسکونی پایدار و پتانسیل‌های برنامه‌ریزی بار لوازم خانگی را با محدودیت‌های مرتبط دربرمی‌گیرد [۵]. با توجه به مطالعات انجام‌شده در گذشته از منابع انرژی تجدیدپذیر و برق شبکه در راستای تأمین انرژی خانه هوشمند استفاده شده است. تعرفه قیمت به صورت ثابت بوده و یک باتری به عنوان ذخیره‌ساز حضور دارد. همچنین مقادیر مختلف سطح شارژ اولیه ذخیره‌ساز مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. مهمترین مطالب این مقاله شامل موارد ذیل است:

- مدل‌سازی ارائه‌شده در این مقاله یک روش تحلیلی خطی تأمین برق خانه هوشمند شامل منبع ذخیره ساز، توربین بادی، سلول خورشیدی، خودروی الکتریکی با قابلیت بازگشت انرژی ذخیره شده و شبکه توزیع است.
 - امکان‌سنجی تأمین برق مقرون به صرفه خانه هوشمند با استفاده از روش بهینه‌سازی ساقه و ریشه^۵ به کمک جعبه ابزار YALMIP در نرم‌افزار متلب انجام می‌شود. بهینه‌سازی با بهره‌گیری از قیود عمومی و مرزی و با توجه به سطح شارژ اولیه منبع ذخیره‌ساز و تأثیر اهمیت آن بر روی قیمت منابع مختلف تأمین انرژی اعم از منابع تجدید پذیر و شبکه برق مبتنی بر تعرفه‌های ثابت و متغیر مطابق با آخرین تعرفه مصرفی کشور ایران سفارشی سازی می‌شود.
- ساختار مقاله به این شرح است که پس از بیان مسئله و اهمیت موضوع، در بخش ۲ پیشینه پژوهش مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در بخش ۳ روش پیشنهادی با معرفی فلوچارت مراحل اجرایی و فرمول‌سازی مدل پیشنهادی توضیح داده می‌شود. در بخش ۴ ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی بیان می‌شود و در بخش ۵ شبیه‌سازی مورد‌های مطالعاتی و در بخش ۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی بیان می‌شود.

۲. پیشینه پژوهش

مطالعات نشان می‌دهد ساختمان‌های دارای انرژی صفر خالص^۶ (NZEB) نویدبخش کاهش مشکلات روزافزون انرژی و زیست-محیطی هستند [۶].

وسایل نقلیه الکتریکی پلاگین هیبریدی^۷ (PHEV) بیانگر بهبود بهره‌وری انرژی و سازگاری با محیط زیست هستند، با این حال، بدون کنترل مناسب، شارژ آن‌ها تأثیر مضر بر روی شبکه توزیع برق، از جمله ازدحام بار و افت ولتاژ ایجاد می‌کند [۷].

نویسندگان در مرجع [۸] برنامه‌ریزی شارژ بهینه را برای وسایل نقلیه الکتریکی^۸ (EV) در یک ایستگاه شارژ با چندین نقطه شارژ در نظر گرفته‌اند. ایستگاه شارژ مجهز به دستگاه‌های تولید انرژی

در حال حاضر، تمرکز قابل توجهی بر روی فناوری‌های سبز برای برداشتن گام‌هایی در جهت استفاده بیشتر از منابع انرژی تجدیدپذیر در بخش حمل و نقل و همچنین کاهش آلودگی است [۱۷].

بهینه‌سازی خودروی الکتریکی هیبریدی، نسخه ترکیبی (از دحام ذرات و الگوریتم جستجوی گرانشی) در تولید نتایج نسبت به سایر تکنیک‌های بهینه‌سازی مستقل عملکرد بسیار خوبی داشته‌است. با در نظر گرفتن رشد فزاینده خودروهای الکتریکی، تعداد امکانات شارژ در مناطق شهری ناکافی خواهد بود [۱۸]، بنابراین مدیریت کارآمد شارژ وسایل نقلیه الکتریکی برای مدیریت و تخصیص منابع کمیاب ایستگاه شارژ مورد نیاز است. یک سیستم مدیریت شارژ هوشمند را با استفاده از استراتژی شارژ طراحی و پیاده‌سازی کرده‌اند که شامل مدیریت رزرو مؤثر و تخصیص کارآمد ایستگاه شارژ است.

در مرجع [۱۹] با در نظر گرفتن تحرک وسیله نقلیه، زیرساخت شارژ، و سهم بازار وسایل نقلیه الکتریکی، ویژگی‌های بار واقعی و آماده برای استفاده توسعه یافته‌است. پژوهشی دیگر به بررسی آلودگی کربن محیطی در شهرها و کنترل پیشگیری با استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی پلاگین می‌پردازد [۲۰]. نتایج نشان می‌دهد که خودروهای الکتریکی هیبریدی می‌توانند با ترکیب مدل پیشنهادی با انحراف مجاز از حالت شارژ، به مصرف سوخت بهتری دست یابند.

محققان در پژوهشی دیگر مکانیزم‌های شارژ خودروهای الکتریکی جدیدی را پیشنهاد می‌کنند که نه تنها در ارائه خدمات جانبی تأثیرگذار است، بلکه به کاهش هزینه شارژ و جلوگیری از سرمایه‌گذاری اضافی در واحدهای تولید پیک و در عین حال به حداکثر رساندن خودروهای الکتریکی یکپارچه کمک می‌کند [۲۱].

با استناد به مطالعات مرجع [۲۲] می‌توان گفت در شبکه هوشمند $^{11}(SG)$ ، مدیریت انرژی تعاملی $^{11}(TEM)$ یکی از امیدوارکننده‌ترین رویکردها برای تقویت مشارکت مصرف‌کننده در تولید انرژی، مدیریت انرژی، و ایجاد مدل‌های غیرمتمرکز بازار انرژی با استفاده از هم‌تا به هم‌تا $P2P^{12}$ است. جدول (۱) مطالعات انجام‌شده در این بخش را به صورت خلاصه و با مقایسه چالش‌ها، متدهای پیشنهادی، مزایا و معایب نشان می‌دهد.

تجدیدپذیر بوده و همچنین می‌تواند انرژی را از شبکه برق خریداری کند. هدف این بوده‌است که میانگین زمان انتظار خودروهای الکتریکی را با محدودیت طولانی مدت در هزینه به حداقل برسانند. چارچوبی از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف $^{13}(MDP)$ برای بررسی مشکل بهینه‌سازی تصادفی محدود پیشنهاد شده‌است.

در مرجع [۹] اجرای پاسخ تقاضا نه تنها می‌تواند پایداری سیستم برق را تضمین کند، بلکه هزینه مصرف برق کاربر را نیز کاهش می‌دهد. در مرجع [۱۰] استفاده از داده‌های هوشمند مسکونی می‌تواند به مدیریت و کنترل شبکه‌های توزیع کمک کند. این امر مزایای قابل توجهی را برای خرده‌فروشان برق و همچنین اپراتورهای سیستم توزیع فراهم می‌کند.

در مرجع [۱۱] انتظارات زیادی از شبکه برق هوشمند برای ارائه خدمات انرژی پایدار با استفاده از جریان دو طرفه داده و توان وجود دارد که توسط اطلاعات، ارتباطات و زیرساخت‌های کنترلی پیشرفته فعال می‌شود. یکی از عناصر مهم چنین شبکه هوشمندی، مصرف‌کنندگان هستند، یعنی مصرف‌کنندگانی که همچنین انرژی مازاد را با شبکه و سایر کاربران تولید و به اشتراک می‌گذارند.

در مرجع [۱۲] در شبکه برق سنتی، مصرف‌کنندگان انرژی از الگوهای مصرف برق خود غافل می‌مانند و در نتیجه انرژی و همچنین پول هدر می‌رود. مدیریت سمت تقاضا در شبکه هوشمند با استفاده از سیستم‌های مدیریت انرژی خودکار ساخته‌شده بر اساس فناوری‌های پیشرفته مانند اینترنت اشیا و محاسبات ابری در جهت کاهش هزینه کمک می‌کند [۱۳]. الگوهای جدیدی مانند تقاضای انعطاف‌پذیر و قابلیت‌های وسیله نقلیه به خانه با پیگیری مدیریت کارآمدتر دارایی‌های مختلف داخلی مانند لوازم خانگی هوشمند، ژنراتورهای تجدیدپذیر کوچک و تأسیسات ذخیره‌سازی ظاهر شده‌اند. در نظر گرفتن این نوع استراتژی‌های مدیریتی نقش حیاتی در طراحی مراحل سیستم‌های برق‌رسانی برای خانه‌های ایزوله دارد [۱۴]. سطح وسیع سقف‌های مسکونی موجود در سرتاسر کانادا منبعی دست نخورده برای سرمایه‌گذاری در مدیریت غیرفعال و فعال تابش خورشیدی برخوردار است. هدف این تحقیق، ارزیابی فناوری‌های جدید، برداشت انرژی مانند سیستم سقف یکپارچه فتوولتائیک با لایه نازک است که می‌تواند به عنوان یک سقف معمولی برای حفاظت از آب و هوا در حین تولید برق خورشیدی پاک عمل کند و میکرو اینورترهای نسل جدید که دارای پتانسیل عملکرد بهتر از اینورترهای رشته‌ای در شرایط سایه و برف است [۱۵].

یک روش یادگیری تقویتی عمیق برای بهینه‌سازی برق در خانه‌های هوشمند به این صورت است که دستگاه‌ها می‌توانند فرمان را بر عهده بگیرند و هوشمندانه عمل کنند و سازگار با اجرای تکنیک‌های بهینه‌سازی سفارشی‌سازی شوند. کنترل مبتنی بر هوش مصنوعی این دستگاه‌های هوشمند، مدیریت تقاضای مصرف برق را ممکن می‌سازد [۱۶].

جدول ۱: مقایسه چالش‌ها متدها مزایا و معایب در مطالعات پیشین

معایب	مزایا	راهکار	چالش	مرجع
عدم جامعیت در فاکتورهای ارزیابی عدم مقیاس‌پذیری	شبیه‌سازی Monte Carlo محاسبه تراز انرژی سالانه محاسبه تنش شبکه	یک روش بهینه‌سازی طراحی RES چندمعیاره را برای NZEBs تحت عدم قطعیت	تعادل سالانه انرژی بین تولید انرژی تجدیدپذیر و مصرف انرژی ساختمان	[۶]
عدم پیش‌بینی دقیق	چارچوب غیر متمرکز مدیریت برخط و استقرار ساده مقایله با افت ولتاژ	شارژ غیرمتمرکز تصادفی PHEV تحت محدودیت‌های شبکه توزیع	افت ولتاژ و اوج بار در زمان شارژ با زیرساخت متمرکز	[۷]
عدم تشخیص زمانبندی ورود	مدل آگاه از قیمت برق شبکه استفاده از فرایند تصادفی و مدل تصمیم‌گیری مارکوف	برنامه‌ریزی شارژ وسایل نقلیه الکتریکی با انرژی تجدیدپذیر محلی	زمان انتظار شارژ خودروی الکتریکی در ایستگاه شارژ	[۸]
عدم ارائه راهکار تضمین حریم خصوصی در زمانی که خودروی برقی متصل به مدل خود نیازمند شارژ است	تنظیم منطقی برق خانگی در پاسخ به شبکه برق DR تنظیم کنترل سطح دسترسی کنتور هوشمند جهت حفظ حریم خصوصی	یک طرح زمان‌بندی بهینه برای برق خانه هوشمند با در نظر گرفتن پاسخ تقاضا و حفاظت از حریم خصوصی	چالش حریم خصوص کاربران خانه-های هوشمند در استفاده از کنتور هوشمند و مرکز کنترل	[۹]
تحلیل هزینه اضافی به کاربران خانه-های هوشمند	پیشنهاد یک الگوریتم جدید جهت غلبه بر چالش تضمین بهره‌وری	حفظ حریم خصوصی داده‌های کنتور هوشمند در یک محیط شبکه هوشمند	چالش حریم خصوص در استفاده از داده‌های کنتورهای هوشمند خانه-های هوشمند مسکونی	[۱۰]
عدم مقایسه بهره‌وری سیستم در بهره‌گیری از انواع پروتکل‌های ارتباطی	پشتیبانی از انواع پروتکل‌های ارتباطی استفاده از بهینه‌سازی خطی و غیر خطی	مدیریت انرژی مبتنی بر مصرف‌کننده و به اشتراک‌گذاری در شبکه هوشمند	تأثیر مصرف‌کنندگان در شبکه‌های هوشمند آینده	[۱۱]
عدم بهره‌مندی مؤثر از گره‌های مه	نظارت مصرف انرژی وسایل الکتریکی مبتنی بر حسگرهای جریان و ولتاژ بارگذاری داده‌های حس شده در فضای ابری Google Firebase از طریق پروتکل ارتباطی چند به چند IoT	اینترنت اشیا و سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر محاسبات ابری برای مدیریت تقاضا در شبکه هوشمند	غافل بودن مصرف‌کنندگان انرژی از الگوهای مصرف برق و شکاف زیاد بین عرضه و تقاضا که منجر به قطعی مکرر برق و کاهش بار می‌شود	[۱۲]
ابهام در تعمیم مدل به فضای نمونه گسترده‌تر	روشی مبتنی بر MILP برای برنامه‌ریزی بهینه سیستم‌های برق‌رسانی ترکیب استراتژی‌های مختلف سمت تقاضا مطالعه موردی با طرح‌بندی‌های مختلف و استراتژی‌های مدیریت سمت تقاضا	برقی‌سازی بهینه خانه‌های هوشمند خارج از شبکه با توجه به تقاضای انعطاف‌پذیر و قابلیت‌های خودرو به خانه	استفاده از خودروهای الکتریکی به عنوان ژنراتورهای تجدیدپذیر کوچک و تأسیسات ذخیره‌سازی	[۱۴]
عدم کفایت علمی لازم در راستی-آزمایی	تحلیل بازخورد انسانی در تابع هدف تکنیک DSM که تحت عنوان سیستم توصیه انرژی خانگی (HERS) بیان می‌شود لحاظ داده‌های فعالیت انسانی در تعریف حالت RL برای افزایش عملکرد بهینه‌سازی	سیستم توصیه انرژی خانه (HERS): یک روش یادگیری تقویتی عمیق بر اساس بازخورد و فعالیت ساکنان	نیاز به رویکردهای تصمیم‌گیری دستگاه‌های هوشمند	[۱۶]

۳. مدل پیشنهادی

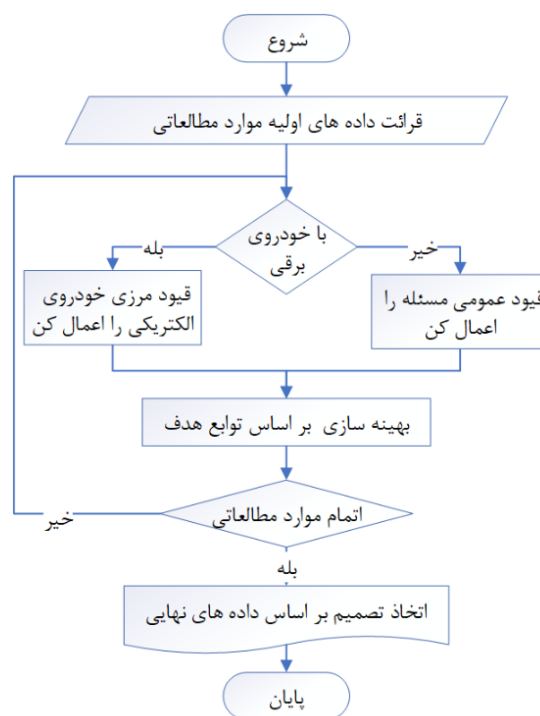
در این بخش نوآوری مقاله توضیح داده می‌شود. ابتدا در بخش ۳-۱ فلوچارت مدل پیشنهادی توضیح داده می‌شود. سپس در بخش ۳-۲ در قالب دو زیر بخش فرمول‌سازی مدل پیشنهادی به همراه جدول متغیرهای مورد بررسی ارائه می‌گردد.

۲.۳. فرمول‌سازی مدل پیشنهادی

مدیریت انرژی در نظر گرفته شده مربوط به یک خانه هوشمند دارای فناوری‌های تولید پراکنده، ذخیره‌ساز انرژی و خودروی الکتریکی است که می‌تواند برق خود را از شبکه خریداری کرده و یا از منابع تولید پراکنده تأمین نماید. در این مقاله فروش برق به شبکه امکان‌پذیر نبوده و فرض شده است که کنتورهای هوشمند منازل قابلیت محاسبه فروش برق به شبکه را نداشته و صرفاً به صورت یک طرفه (از شبکه به منزل) می‌توانند عمل نمایند. تعرفه خرید برق از شبکه نیز به دو صورت ثابت و یا تعرفه زمان مصرف در نظر گرفته شده است.

۱.۲.۳. مدل‌سازی خانه هوشمند متصل به خودروی الکتریکی

در این مدل‌سازی خودروی الکتریکی به عنوان یک نوع ذخیره‌ساز خاص به خانه هوشمند [۱] اضافه می‌شود. خودروی الکتریکی یک مدل ذخیره‌ساز است که تنها یک تفاوت عمده با ذخیره‌ساز باتری دارد. در خودروی الکتریکی اهمیت شارژ خودرو قبل از خروج از منزل نیز به عنوان محدودیت به مسئله اضافه می‌شود. هر راننده می‌تواند صرفاً به اندازه‌ای که برای سفرهای خود در روز نیاز دارند، خودروی خود را شارژ نماید. معمولاً شارژ بالای ۸۰ درصد، بسیاری از نیازهای راننده خودرو را تأمین خواهد کرد و لزومی به شارژ ۱۰۰ درصدی نیست. این روش را شارژ هوشمند گویند. زمانی که خودرو حضور دارد، به‌طور خلاصه می‌توان گفت که ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی منزل افزایش می‌یابد. باتری در هر لحظه از روز چون درون منزل قرار دارد می‌تواند شارژ یا دشارژ شود اما زمان دسترسی به خودروی الکتریکی کمتر از زمان دسترسی به باتری است. با این حال ترکیب این دو فناوری می‌تواند مزایای متعددی را به همراه داشته باشد. در جدول ۲ تمامی متغیرهای مورد استفاده در این مدل پیشنهادی معرفی شده‌اند که در ادامه مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۱: فلوچارت مدیریت تأمین انرژی در خانه هوشمند

۱.۳. مدیریت تأمین انرژی پایدار خانه هوشمند

فرایند مدیریت تأمین انرژی پایدار و ارزان قیمت خانه هوشمند در قالب فلوچارت در شکل ۱ آمده است که داده‌های اولیه مربوط به تجهیزات شبکه از قبیل اطلاعات بار مصرفی، وزش باد، تابش خورشید، مشخصات فنی تجهیزات و هزینه‌های خرید برق از شبکه بالادستی یا منابع تجدیدپذیر قرائت می‌شود تا چگونگی تأمین انرژی خانه هوشمند مطابق با موارد مطالعاتی از پیش تعیین شده مورد تحلیل قرار گیرد. لازم است در این مرحله حضور یا عدم حضور خودروی الکتریکی با قابلیت بازگشت انرژی مورد بررسی قرار گیرد. در صورتی که فرایند شامل خودرو باشد، قیود مرزی مربوط به خودروهای الکتریکی نیز به قیود عمومی مسأله افزوده می‌شود، اما در صورتی که فاقد خودروی الکتریکی باشد، صرفاً قیود عمومی مسأله اعمال می‌شود. فرایند بهینه‌سازی بر اساس توابع هدف تا اتمام موارد مطالعاتی ادامه می‌یابد و در نهایت تصمیمات مربوطه بر اساس نتایج و داده‌های نهایی اتخاذ خواهد شد.

جدول ۲: معرفی متغیرهای مورد استفاده در روابط تحلیلی

ردیف	متغیرها	توضیحات
۱	E_t^{pv}	توان خریداری شده از سلول خورشیدی (کیلو وات ساعت)
۲	E_t^{EV}	توان مصرفی خودروی الکتریکی در هر لحظه (کیلو وات ساعت)
۳	E_t^{gr}	توان خریداری شده از شبکه (کیلو وات ساعت)
۴	E_t^w	توان خریداری شده از توربین بادی (کیلو وات ساعت)
۵	E_t^{ch}, E_t^{dch}	توان شارژ و دشارژ باتری ذخیره ساز (کیلو وات ساعت)
۶	E_t^d	میزان توان مصرفی منزل مسکونی (کیلو وات ساعت)
۷	E_t^{bat}	میزان توان ذخیره شده در باتری (کیلو وات ساعت)
۸	c_t^{gr}	قیمت برق خریداری شده از شبکه در هر لحظه (تومان بر کیلو وات ساعت)
۹	c_t^e	قیمت برق خریداری شده از منابع تجدیدپذیر (تومان بر کیلو وات ساعت)
۱۰	$E_{min}^{pv}, E_{max}^{pv}$	حداقل و حداکثر توان خریداری شده از سلول خورشیدی
۱۱	$E_{min}^{chEV}, E_{max}^{chEV}$	حداقل و حداکثر توان شارژ خودروی الکتریکی
۱۲	$E_{min}^{dchEV}, E_{max}^{dchEV}$	حداقل و حداکثر توان دشارژ خودروی الکتریکی
۱۳	E_{min}^w, E_{max}^w	حداقل و حداکثر توان خریداری شده از توربین بادی
۱۴	$E_{min}^{ch}, E_{max}^{ch}$	حداقل و حداکثر توان خریداری شده از شبکه
۱۵	$E_{min}^{ch}, E_{max}^{ch}$	حداقل و حداکثر توان شارژ باتری ذخیره ساز
۱۶	$E_{min}^{dch}, E_{max}^{dch}$	حداقل و حداکثر توان دشارژ باتری ذخیره ساز
۱۷	u_t^{ch}, u_t^{dch}	مقادیر باینری وضعیت شارژ یا دشارژ باتری ذخیره ساز
۱۸	u_t^{chEV}, u_t^{dchEV}	مقادیر باینری وضعیت شارژ یا دشارژ خودروی الکتریکی
۱۹	η_{wt}, η_{pv}	راندمان مربوط به توربین بادی و سلول خورشیدی
۲۰	I_t^{pv}	شدت تابش خورشید (وات بر متر مربع)
۲۱	V_t^w	سرعت باد (متر بر ثانیه)
۲۲	ρ_{air}	چگالی هوا
۲۳	A_{pv}, A_{wt}	سطح مقطع سلول خورشیدی و توربین بادی (مترمربع)
۲۴	SOC_0	سطح شارژ ذخیره شده اولیه
۲۵	SOC_t^{bat}, SOC_t^{EV}	سطح شارژ ذخیره شده در باتری و خودروی الکتریکی
۲۶	t_{ar}, t_{dep}	زمان ورود و خروج خودرو به/از پارکینگ

۲.۲.۳. فرمول‌های مدل‌سازی تأمین انرژی

مدل مربوط به مدیریت انرژی یک منزل مسکونی در حضور خودروی الکتریکی معمولاً دارای یک تابع هدف، تعدادی قیود مرزی و متغیرهای بهینه‌سازی است. متغیرهای بهینه‌سازی همان مجهولات مسئله هستند که در اینجا توان خریداری شده از شبکه، سلول خورشیدی، توربین بادی، شارژ یا دشارژ باتری ذخیره ساز می‌باشند. اطلاعات معلوم مسئله نیز میزان بار مصرفی منزل مسکونی، توان مصرفی خودروی الکتریکی در هر لحظه، قیمت برق خریداری شده از شبکه و منابع تجدیدپذیر در هر لحظه می‌باشند. این متغیرها در جدول ۲ معرفی شده‌اند. در مدل‌سازی به روش خطی، یک متغیر به صورت تابعی از یک یا چند متغیر قابل پیش‌بینی قابل توصیف است. از آنجاکه اهم

متغیرهای مورد استفاده در این مقاله از این ویژگی مشترک برخوردارند، بنابراین از مدل‌سازی خطی استفاده می‌شود تا علاوه بر تسریع فرایند پردازش، جواب به دست آمده با کمترین سربار به جواب مورد انتظار نزدیک باشد که به طور قابل توجهی منجر به کاهش مصرف انرژی در برنامه مدیریتی تأمین انرژی در خانه هوشمند می‌شود. بنابراین هدف از مدل‌سازی خطی ارائه شده، افزایش درصد قابل قبولی از نتیجه حقیقی است به‌ویژه در شرایطی که برنامه کاربردی مدل‌سازی تأمین انرژی خانه هوشمند با کمترین سربار محاسباتی قابل تعمیم به کلان سیستم در مقیاس شهر هوشمند باشد. در این مقاله از روش ساقه و ریشه یا شاخه و حد برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود، که این الگوریتم با شمارش تمام راه‌حل‌های یک مسئله راه‌حل‌های بی‌نتیجه را که در جواب انتهایی تأثیری ندارند و حل آن‌ها فقط منجر به اتلاف

وقت می شود حذف و یا به عبارتی هرس می کند تا کران های بالا و پایین بهینه شوند و جواب بهینه مسئله را در انتها نمایش می دهد. تابع هدف انواع مدل های بهینه سازی معمولاً هزینه برق مصرفی مشترکین خانگی است که هزینه برق مصرفی مشترکین در طول یک روز برابر خواهد بود با:

$$\min C_{Elec}^{Total} = \sum_{t=1}^{24} (E_t^{gr} c_t^{gr} + E_t^w c_t^{re} + E_t^{pv} c_t^{re}) \quad (1)$$

که علامت min نشان می دهد بهینه سازی باید سعی کند تا این مقدار را به کمترین حد خود برساند. همواره در مسائل بهینه سازی، قیود مرزی تعریف می شود تا بهینه گر را وادار کند تا تمامی محدودیت های مسئله را رعایت نماید. هرچه قیود مسئله بیشتر باشد، مسئله سختگیرانه تر و فضای جوابها محدودتر خواهد شد. شاید مهم ترین قید محدودکننده مسئله، قید تأمین بار مصرفی مشترک خانگی است. بنابراین:

$$E_t^{gr} + E_t^w + E_t^{pv} = E_t^d + E_t^{Bat} + E_t^{EV}, \quad \forall t \quad (2)$$

درواقع قید فوق (رابطه ۲) ۲۴ محدودیت را به مسئله اعمال می کند. به عبارت دیگر، در هر بازه زمانی (که ۲۴ بازه یک ساعته در روز داریم)، مجموع توان خریداری شده از منابع انرژی و شبکه باید برابر با مجموع توان ذخیره شده در باتری و مصرف شده در بار باشد. محدودیت دیگر در مدیریت انرژی مربوط به قرارگیری هر یک از توان های تولیدی یا مصرفی در محدوده مجاز خود است. برای هر یک از متغیرهای بهینه سازی همواره کران بالا و پایین تعریف می شود که طبق آن داریم:

$$E_{min}^{gr} \leq E_t^{gr} \leq E_{max}^{gr}, \quad \forall t. \quad (3)$$

$$E_{min}^w \leq E_t^w \leq E_{max}^w, \quad \forall t \quad (4)$$

$$E_{min}^{pv} \leq E_t^{pv} \leq E_{max}^{pv}, \quad \forall t \quad (5)$$

$$E_{min}^{ch} u_t^{ch} \leq E_t^{ch} \leq E_{max}^{ch} u_t^{ch}, \quad \forall t \quad (6)$$

$$E_{min}^{dch} u_t^{dch} \leq E_t^{dch} \leq E_{max}^{dch} u_t^{dch}, \quad \forall t. \quad (7)$$

$$E_{min}^{chEV} u_t^{chEV} \leq E_t^{chEV} \leq E_{max}^{chEV} u_t^{chEV}, \quad \forall t. \quad (8)$$

$$E_{min}^{dchEV} u_t^{dchEV} \leq E_t^{dchEV} \leq E_{max}^{dchEV} u_t^{dchEV}, \quad \forall t. \quad (9)$$

طبق رابطه (۳) توان خریداری شده از شبکه باید بین مقدار حداقل خود و حداکثر خود قرار داشته باشد. چون حق فروش به شبکه وجود جدوباز شبکه را نیز معمولاً دیماند کنتور یا همان رقم قرارداد شده با برق منطقه ای در روز نصب کنتور تعیین می کند. در این مقاله این مقدار حدوداً با توجه به مراجع در حدود ۸ کیلووات ساعت $E_{max}^{gr} = 8$ در نظر گرفته شده است.

طبق روابط (۴) و (۵) حد پایین بهره گیری از منابع تجدیدپذیر معمولاً صفر است در واقع مشترکین اختیار دارند که هیچ برقی از این منابع خریداری نکنند. اما اگر برق منطقه ای آن ها را اجبار به بهره گیری از منابع کرده باشد، آنگاه این مقدار حداقلی عددی مثبت خواهد بود. حداکثر توان بهره برداری شده از این منابع را نیز توان در دسترس باد و خورشیدی تعیین می کند. حداکثر توان تولیدی باد و خورشید از روابط زیر به دست می آید که عددی از پیش تعیین شده است و در اختیار طراح قرار می گیرد:

$$E_{max}^w = \frac{6}{\pi} \eta_{wt} \rho_{air} A_{wt} V_t^w \Delta t, \quad \forall t. \quad (10)$$

$$E_{max}^{pv} = \eta_{pv} A_{pv} I_t^{pv} \Delta t, \quad \forall t. \quad (11)$$

در روابط راندمان مربوط به توربین بادی و سلول خورشیدی معمولاً در حدود ۸۵ درصد می باشد.

روابط (۶) و (۷) نیز محدودیت مربوط به توان شارژ و دشارژ باتری ذخیره ساز را نشان می دهد. در این تحقیق ذخیره ساز ۶ کیلوواتی است بنابراین: $E_{max}^{ch} = 6$ و $E_{max}^{dch} = -6$ اگر باتری در حال شارژ باشد، مقدار u_t^{ch} برابر با یک و در غیر این صورت برابر با صفر است. همچنین در صورتی که باتری دشارژ شود مقدار u_t^{dch} برابر با یک و در سایر موارد برابر با صفر است.

در (۹) و (۱۰) حد پایین توان شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی که در این مقاله ذخیره ساز ۲ کیلوواتی است بنابراین $E_{max}^{ch} = 2$ و $E_{max}^{dch} = -2$. محدودیت مهم دیگری که وجود دارد، بحث مربوط به ارتباط توان شارژ E_t^{ch} یا دشارژ باتری E_t^{dch} با سطح شارژ ذخیره شده در آن SOC_t^{Bat} است که داریم:

$$SOC_{t+1}^{Bat} = SOC_t^{Bat} + \underbrace{\eta^{ch} E_t^{ch} + \frac{E_t^{dch}}{\eta^{dch}}}_{E_t^{Bat}}, \quad \forall t \quad (12)$$

و محدودیت دیگر مربوط به ذخیره ساز در محدوده مجاز قراردادن سطح شارژ و برابر بودن سطح اولیه و نهایی شارژ باتری می باشد که در روابط (۱۳) و (۱۴) ذکر شده است:

$$SOC_{min}^{Bat} \leq SOC_t^{Bat} \leq SOC_{max}^{Bat}, \quad \forall t \quad (13)$$

$$SOC_0^{Bat} = SOC_{24}^{Bat} \quad (14)$$

معمولاً حداقل و حداکثر سطح شارژ ذخیره شده در باتری بین ۳۰ و ۹۰ درصد می باشد. این درصد بندی نسبت به ظرفیت کیلووات ساعت نامی باتری بیان می شود که در این مقاله در حدود ۶۵ کیلووات ساعت است. همچنین طبق رابطه (۱۴) سطح اولیه شارژ باتری باید با سطح شارژ نهایی آن برابر باشد. درواقع حق برداشتن انرژی اولیه ای که درون باتری بوده و جایگزین نکردن مجدد آن مقدار انرژی را نخواهیم داشت.

ارتباط میان توان شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی و ذخیره‌ساز در روابط زیر نشان داده شده‌است:

$$SOC_{t+1}^{EV} = SOC_t^{EV} + \underbrace{\eta^{chEV} E_t^{chEV} + \frac{E_t^{dchEV}}{\eta^{dchEV}}}_{E_t^{EV}}, \quad \forall t \in [t_{ar}, t_{dep}] \quad (15)$$

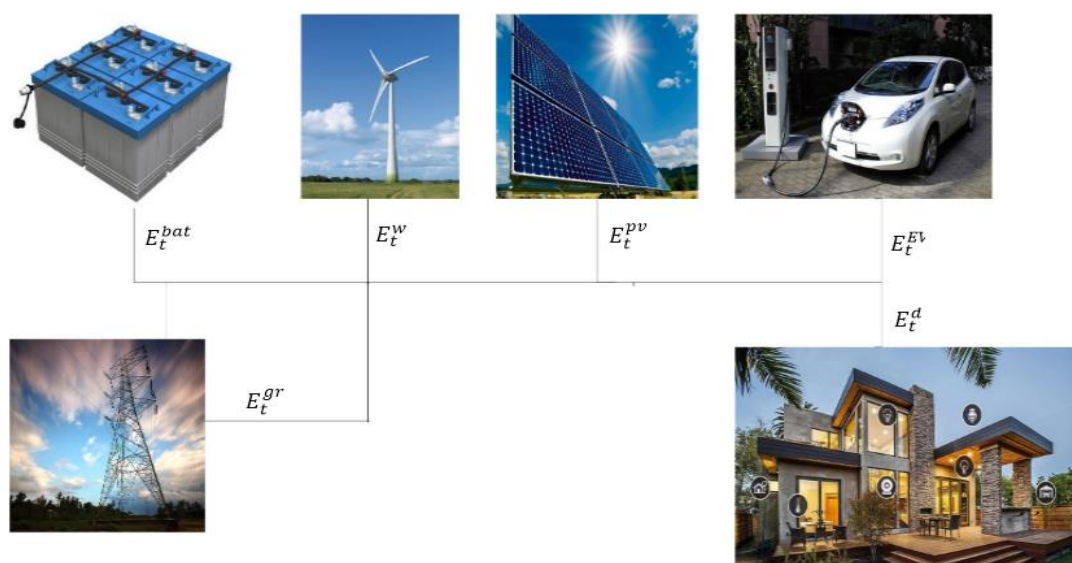
در رابطه (۱۵) در بازه‌های زمانی خارج از این بازه، دیگر دسترسی به خودروی الکتریکی وجود ندارد و هیچ‌گونه تبادل انرژی بین منزل و خودروی الکتریکی رخ نخواهد داد. اما در زمانی که خودرو در پارکینگ حضور دارد، ارتباط میان توان شارژ و دشارژ خودرو از این رابطه تبعیت می‌کند.

محدودیت دیگر مربوط به محدوده مجاز قرار داشتن سطح شارژ و برابر بودن سطح اولیه و نهایی شارژ باتری خودروی الکتریکی بوده که در روابط زیر ذکر شده‌است:

$$SOC_{min}^{EV} \leq SOC_t^{EV} \leq SOC_{max}^{EV}, \quad \forall t \quad (16)$$

$$SOC_{tdep}^{EV} - SOC_{tar}^{EV} = E_{required} \quad (17)$$

رابطه (۱۷) خودروی الکتریکی را وادار می‌کند تا در هنگام خروج خودرو از پارکینگ، انرژی موردنیاز خود را ذخیره نموده‌باشد. درواقع اختلاف سطح شارژ خودرو در زمان خروج نسبت به زمان ورود خودرو به پارکینگ باید برابر با انرژی موردنیاز سفرهای بعدی راننده خودرو باشد. لزومی به شارژ کامل خودرو نیست.



شکل ۲: منابع تأمین انرژی خانه هوشمند در مدل پیشنهادی

۴. ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی

در بخش ۴-۱ داده‌های ورودی و معلومات مسئله در سناریوهای مطالعاتی مشخص می‌شوند. در بخش ۴-۲ اطلاعات فنی ذخیره‌ساز انرژی ارائه می‌گردد و در بخش‌های ۴-۳ و ۴-۴ به ترتیب اطلاعات فنی منابع تجدیدپذیر و اطلاعات اقتصادی تشریح می‌شود. پیاده‌سازی مدل پیشنهادی توسط نرم‌افزار متلب انجام می‌شود و برای حل مسئله بهینه‌سازی از جعبه ابزار مرجع باز YALMIP استفاده می‌شود که برای حل مدل‌های خطی سفرهای سازی شده‌است به‌طوری که به کمک این جعبه ابزار، نیاز به استخراج ضرایب ماتریس‌های قیود مرزی برطرف می‌شود و حل مسئله راحت‌تر صورت می‌پذیرد. مشخصات سیستم مورد

استفاده جهت ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی شامل یک کامپیوتر با حافظه اصلی ۴ گیگابایت، پردازنده Core i7، حافظه جانبی ۱ ترا بایت، کارت گرافیک ۲ گیگابایتی و سیستم عامل ویندوز ۱۰ است.

جدول ۳: منابع تأمین انرژی خانه هوشمند در ساعات مختلف

انرژی دریافتی از شبکه (kwh)	انرژی نور (kwh)	انرژی باد (kwh)	انرژی دریافتی از شبکه (kwh)	زمان (h)	انرژی مورد تقاضای خانه (kwh)	انرژی نور (kwh)	انرژی باد (kwh)	انرژی دریافتی از شبکه (kwh)
۰,۱۹	۴,۱	۱	۰,۸۴	۱۲:۰۰	۰,۶	۰	۰	۰,۰۰
۰,۱۹	۳,۹	۱,۴	۰,۶۲	۱۳:۰۰	۱,۷۲	۰	۰	۰,۱۰
۰,۱۹	۳,۵	۱,۳	۰,۵۶	۱۴:۰۰	۰,۴۶	۰	۰	۰,۲۰
۰,۱۹	۲,۵	۰,۹	۴,۳۴	۱۵:۰۰	۰,۹	۰	۰	۰,۳۰
۰,۳۲	۱,۴	۱,۶۵	۷,۰۲	۱۶:۰۰	۲,۱۸	۰	۰	۰,۴۰
۰,۶	۰,۷	۱,۱۰	۲,۸۲	۱۷:۰۰	۵,۷۲	۰,۱	۰	۰,۵۰
۰,۵۹	۰	۱,۱۵	۲,۴۸	۱۸:۰۰	۶,۹۸	۰,۲	۰,۱	۰,۶۰
۰,۶۱	۰	۰,۳	۸,۴۸	۱۹:۰۰	۴,۸۲	۰,۰۵	۱	۰,۷۰
۲,۲	۰	۰,۱	۳,۶۶	۲۰:۰۰	۱,۴۴	۰,۰۶	۲	۰,۸۰
۰,۶۷	۰	۰,۰۵	۳	۲۱:۰۰	۴,۲۴	۰,۱	۲,۹	۰,۹۰
۰,۶۷	۰	۰,۰۳	۲,۵۸	۲۲:۰۰	۱,۱۶	۰,۱	۳,۷	۱,۰۰
۰,۵۵	۰	۰	۰,۶۸	۲۳:۰۰	۴,۶	۰,۶	۴	۱,۱۰

خورشیدی را در شرایطی که میزان تولید این منابع بیشتر از میزان بار مصرفی است، در خود ذخیره خواهد کرد که در ساعات فقدان انرژی تولیدی این منابع، بتوان ساعاتی از انرژی درون باتری استفاده کرد و برق را تأمین کرد و هزینه‌ها را کاهش داد.

۳,۴. اطلاعات فنی منابع تجدیدپذیر

منابع تجدیدپذیر به کار رفته در این تحقیق یک منبع فتوولتائیک ۵ کیلووات و یک توربین بادی ۱/۵ کیلوواتی است که هر دو منبع دارای راندمان ۸۵ درصدی هستند. درواقع از ۱۰۰ درصد انرژی که دریافت می‌کند میزان ۸۵ درصد به دلایلی نظیر افت ولتاژ، انرژی تولیدی این منابع در روز (توان قابل دسترسی آن‌ها) مطابق با شکل (۳) که در آن کیلووات ساعت تولیدی این منابع در هر ساعت شبانه روز مشخص شده‌است. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است توان تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در ساعات ابتدایی روز و ساعات انتهایی روز نزدیک به صفر است و درواقع بدون ذخیره‌ساز انرژی، نمی‌توان در تأمین انرژی این ساعات از این انرژی استفاده کرد [۱].

در مورد توربین بادی هم وضعیت به همین صورت است. مسلماً شرایط آب و هوایی هر منطقه، این دو منحنی را تغییر خواهد داد و هر شهری از نظر شرایط آب و هوایی و جغرافیایی می‌تواند وزش باد و تابش خاص خود را داشته‌باشد. علاوه بر آن، فصول هم بر این منحنی تأثیرگذار هستند که در این مقاله در نظر گرفته نشده‌است.

۱,۳,۴. اطلاعات فنی خانه هوشمند

میزان انرژی مورد نیاز خانه هوشمند در ساعات مختلف یک شبانه‌روز مطابق با [۲] بر اساس جدول ۳ است.

۱,۴. داده‌های ورودی و معلومات مسئله در سناریوهای مطالعاتی

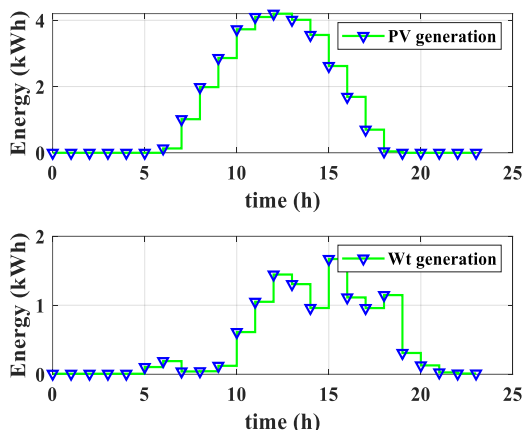
چندین سناریو مطالعاتی بررسی خواهد شد تا درک مطلوبی از مزایای بهره‌گیری از خودروی الکتریکی در کنار منزل مسکونی حاصل شود. انواع تعرفه‌گذاری‌های ثابت و زمان مصرف در تأمین انرژی خانه هوشمند و خودروی الکتریکی مورد بررسی قرار داده خواهد شد. تعرفه‌ها با استفاده از قبض برق منازل مسکونی اعمال شده و ساعات کم‌باری، پرباری یا میان‌باری نیز بر اساس ساعات اعلامی از ضمیمه وزارت نیرو در مسئله قرار داده خواهد شد. شکل ۲ بلوک توصیفی منابع تأمین انرژی خانه هوشمند را در مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که این منابع عبارتند از منبع ذخیره‌ساز (E_t^{bat} ، توربین بادی (E_t^w ، سلول خورشیدی (E_t^{pv}) و شبکه برق (E_t^{gr}) است. خانه هوشمند (E_t^d) در این فرایند به عنوان مصرف‌کننده است و خودروی الکتریکی (E_t^{EV}) علاوه بر مصرف انرژی در صورت ضرورت مشابه ذخیره‌ساز عمل می‌کند و امکان بازگشت انرژی را جهت تأمین برق مصرفی مورد نیاز خانه هوشمند فراهم می‌کند.

۲,۴. اطلاعات فنی ذخیره‌ساز انرژی

همان‌طور که پیشتر بیان شد، منبع ذخیره‌ساز استفاده شده دارای ظرفیت ۶۵ کیلووات ساعت و توان دریافتی ۶ کیلووات است که حداقل سطح مجاز انرژی آن ۴۰ درصد و حداکثر سطح مجاز انرژی آن ۹۰ درصد است. راندمان شارژ و دشارژ این ذخیره‌ساز نیز ۸۵ درصد می‌باشد. نقش ذخیره‌ساز هم می‌تواند به عنوان برق اضطراری باشد و هم اینکه به عنوان یک واسط انرژی، انرژی مازاد منابع بادی و

۲.۳.۴. اطلاعات فنی خودروی الکتریکی

خودروی الکتریکی مورد بررسی در این مقاله یک خودروی نیسان لیف است که دارای یک باتری ۲ کیلوواتی، ۸ کیلووات ساعت است و سطح شارژ درون باتری حداقل ۲۰ درصد و حداکثر ۹۵ درصد ظرفیت باتری باید باشد. مصرف انرژی این خودرو بسته به سرعت و میزان پیمایش آن و شرایط ترافیکی متفاوت است اما به طور میانگین در حدود ۵۰ وات ساعت در هر کیلومتر برق مصرف می‌کند. در این مطالعه ساعت ورود برابر ساعت ۲۰ و ساعت خروج برابر ساعت ۶ صبح در نظر گرفته شده است. در زمانی که خودروی الکتریکی درون منزل است، به پریز برق متصل است و می‌تواند شارژ یا دشارژ شود اما در ساعاتی که بیرون منزل است، دیگر امکان شارژ آن ممکن نیست و در مسئله لحاظ نخواهد شد. همچنین فرض شده است که خودرو با ۲۰ درصد سطح شارژ خود به منزل می‌رسد و با سطح شارژ ۹۰ درصد از منزل خارج خواهد شد. راندها شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی نیز برابر با ۸۵ درصد لحاظ شده است.



شکل ۳: توان تولیدی منابع خورشیدی (بالا) و بادی (پایین) در ساعات مختلف شبانه‌روز [۱]

جدول ۴: تعرفه زمان مصرف برق موردنظر مقاله

کم باری	میان باری	پر باری (اوج مصرف)
۱۲ شب تا ۸ صبح	۸ صبح تا ۸ شب	۸ شب تا ۱۲ شب
۱۵۰ تومان بر کیلووات ساعت	۲۰۰ تومان بر کیلووات ساعت	۳۰۰ تومان بر کیلووات ساعت
۲۰۰ تومان بر کیلووات ساعت	۲۰۰ تومان بر کیلووات ساعت	۲۰۰ تومان بر کیلووات ساعت
۰/۷۵	۱	۱/۵

۴.۴. اطلاعات اقتصادی

در این مقاله دو تعرفه مورد بررسی قرار می‌گیرد، تعرفه ثابت و تعرفه زمان مصرف. در تعرفه ثابت قیمت خریداری برق از شبکه بالادستی ثابت بوده و نسبت قیمت آن به قیمت خریداری برق از منابع تجدیدپذیر برابر ۱/۵ در نظر گرفته شده است. در مورد تعرفه زمان مصرف برق نیز ساعات شبانه‌روز به سه بازه زمانی کم‌باری، اوج مصرف و میان‌باری تقسیم می‌شود. اطلاعات لازم درخصوص تعرفه زمان مصرف برگرفته از آخرین تعرفه برق (آبان ماه ۱۴۰۲) از وزارت نیرو است و از وبسایت شرکت توزیع نیروی برق تهران بزرگ ۱۳ دریافت شده است [۲۳] که جزئیات آن در جدول ۴ ذکر شده است. انتظار می‌رود که در ساعاتی که نسبت قیمت برق شبکه به قیمت برق تجدیدپذیر بیشتر از یک باشد، خریداری برق از منابع تجدیدپذیر انجام شود و در صورتی که نسبت قیمت برق شبکه به تجدیدپذیر کمتر از یک باشد، خریداری‌های برق از شبکه سراسری صورت گیرد.

۵. شبیه‌سازی موردی مطالعاتی

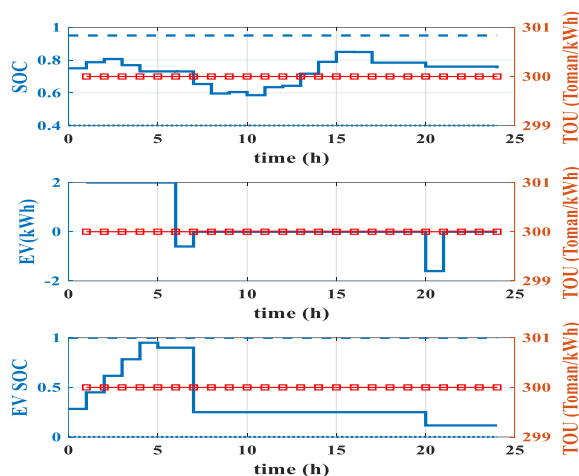
در ادامه و در بخش ۵.۱، تعرفه قیمت‌گذاری ثابت به عنوان مورد مطالعاتی ۱ توضیح داده می‌شود. در بخش ۵.۲، تعرفه زمان مصرف با دو رویکرد حالت اجبار و حالت اختیار جهت مورد مطالعاتی ۲ توضیح داده می‌شود. در بخش ۵-۳ تحلیل حساسیت مسئله نسبت به سطح

شارژ اولیه ذخیره‌ساز مشخص شده و در زیر بخش‌های ۵-۳-۱ و ۵-۳-۲ به ترتیب موردی مطالعاتی ۱ و ۲ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

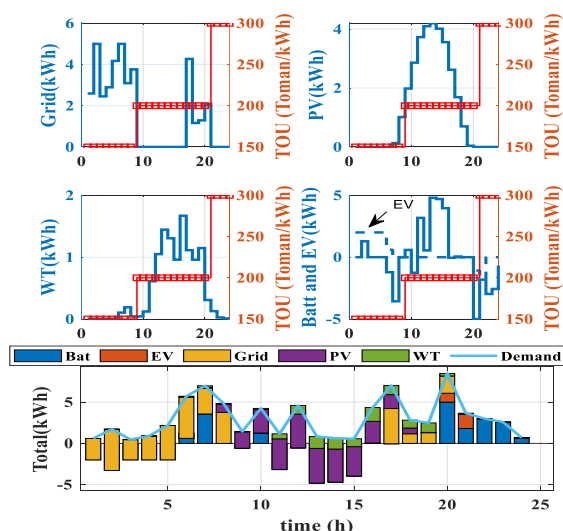
۵.۱. مورد مطالعاتی ۱: تعرفه قیمت‌گذاری ثابت

در این مورد مطالعاتی قیمت‌گذاری از نوع ثابت است. نتایج مربوط به این مورد مطالعاتی در قالب شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. چون قیمت برق شبکه بیشتر از قیمت منابع تجدیدپذیر است، از تمامی ظرفیت این منابع استفاده شده و صرفاً در مواقعی که با کمبود برق مواجه‌ایم، از شبکه خریداری شده است. نتایج کمی مربوط به مقدار توان خریداری شده از شبکه و منابع تجدیدپذیر به همراه هزینه‌های آن‌ها در قالب جدول ۴ نشان داده شده است. در این مورد مطالعاتی دو حالت در نظر گرفته می‌شود: حالت ۱ الف که در آن اجبار به خرید تمام انرژی تولیدی منابع تجدیدپذیر است. فرض الزامی بودن خرید منابع تجدیدپذیر در راستای کاهش تمایل استفاده از انرژی مصرفی مبتنی بر انرژی‌های فسیلی تعیین می‌شود که در جهت رعایت الزامات توسعه برق هوشمند و انرژی مصرفی شهر هوشمند قابل اجراست. لذا سنجش الزام استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر از نظر مقرون به صرفه بودن برای مصرف‌کننده ضروری به نظر می‌رسد. حالت ۱ ب که در آن اختیار در خرید انرژی از منابع وجود دارد.

خروج از خانه و بعد از ورود به خانه که دارای انرژی می‌باشد تا حدودی به تأمین انرژی مورد تقاضای خانه هوشمند کمک می‌کند.



شکل (۵): سطح شارژ درون باتری، خودروی الکتریکی و میزان انرژی خودروی الکتریکی در مورد مطالعاتی ۱

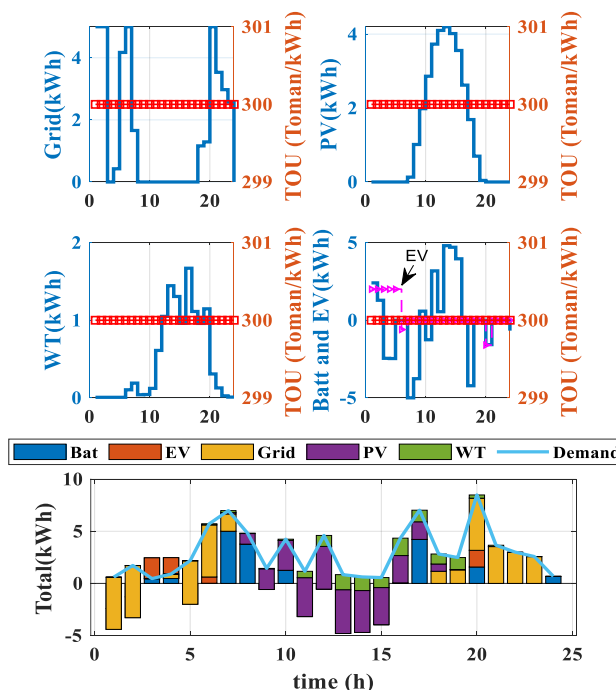


شکل ۶: انرژی شبکه، فتوولتائیک، توربین باد، باتری، خودرو و مجموع آن‌ها در مورد مطالعاتی ۲ الف

۲.۵. مورد مطالعاتی ۲:

۲.۵.۱. تعرفه زمان مصرف با حالت اجبار

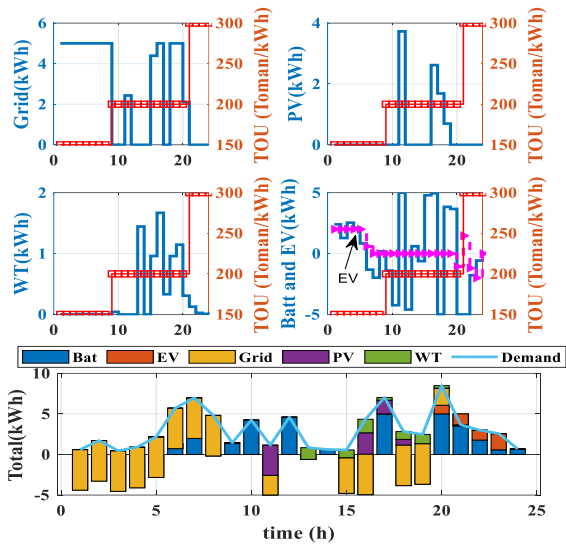
در این مورد مطالعاتی قیمت برق ثابت نیست. مشابه مورد مطالعاتی قبل در اینجا نیز دو مورد مطالعاتی ۲ الف (اجبار در بهره‌برداری حداکثری از منابع تجدیدپذیر) و ۲ ب (اختیار در تصمیم‌گیری) تعریف می‌شود. شکل‌های (۶) و (۷) مربوط به مورد مطالعاتی ۲ الف بوده است. مطابق شکل ۶ با توجه به تعرفه قیمت‌گذاری در ساعات کم‌باری انرژی از شبکه خریداری می‌شود اما چون اجبار به خرید تمام توان منابع انرژی تجدیدپذیر بوده میزان انرژی که از شبکه خریداری می‌شود دقیقاً برابر با مورد مطالعاتی قبل می‌گردد.



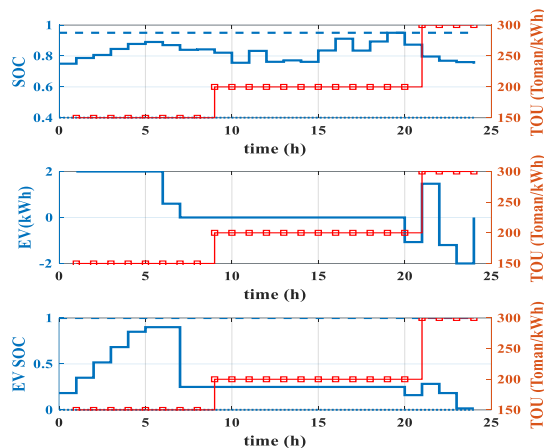
شکل ۴: انرژی شبکه، فتوولتائیک، توربین باد، باتری، خودرو و مجموع آن‌ها در مورد مطالعاتی ۱

در شکل ۴ تمام توان تولیدی منابع بادی و خورشیدی با توجه به هزینه کمتر آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است و در صورتی که این توان مازاد بر مصرف بوده، از باتری برای ذخیره‌سازی این توان استفاده شده است و در حالی که این مجموع توان تولیدی منابع کمتر از بار بوده، الباقی توان از باتری تزریق شده‌است و اگر باتری نیز خالی شده باشد، این توان از شبکه بالادستی خریداری شده است. مقادیر منفی نشانگر تخلیه باتری می‌باشد که هر بار توسط یک منبع انرژی شارژ می‌شود. با توجه به ساعت ورود و خروج خودروی الکتریکی ملاحظه می‌شود تا قبل از ساعت ۶ خودرو شارژ می‌شود و ساعت ۲۰ به خانه برمی‌گردد و با انرژی باقیمانده خود به تأمین انرژی در این ساعات کمک می‌کند. عبارت $TOU^{۱۴}$ در شکل ۴ معرف هزینه مصرفی با واحد تومان بر کیلووات ساعت (Toman/KWh) است. نتایج شکل ۴ با پیش‌فرض تعرفه قیمت‌گذاری ثابت به دست آمده‌است و مستقل از ساعات کم‌باری، میان‌باری و اوج بار است و برای هر دو مورد مطالعاتی ۱ الف و ۱ ب یکسان است.

در شکل ۵ سطح شارژ درون باتری SOC، انرژی خودروی الکتریکی و سطح شارژ درون خودروی الکتریکی EV SOC مشخص شده‌اند. درواقع با حضور خودروی الکتریکی باتری دیگری به مجموعه اضافه می‌شود، با این تفاوت که خودروی الکتریکی به انرژی برای خود هم نیاز دارد و نمی‌تواند تمام آن را در اختیار خانه قرار دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود خودرو از ساعت ۱۲ شب به بعد که خانه هوشمند میزان انرژی کمتری را تقاضا دارد باتری خود را شارژ می‌کند و قبل از



شکل ۸: انرژی شبکه، فتوولتائیک، توربین باد، باتری، خودرو و مجموع آنها در مورد مطالعاتی ۲ ب



شکل ۹: سطح شارژ درون ذخیره‌ساز، خودروی الکتریکی و میزان انرژی خودروی الکتریکی در مورد مطالعاتی ۲ ب

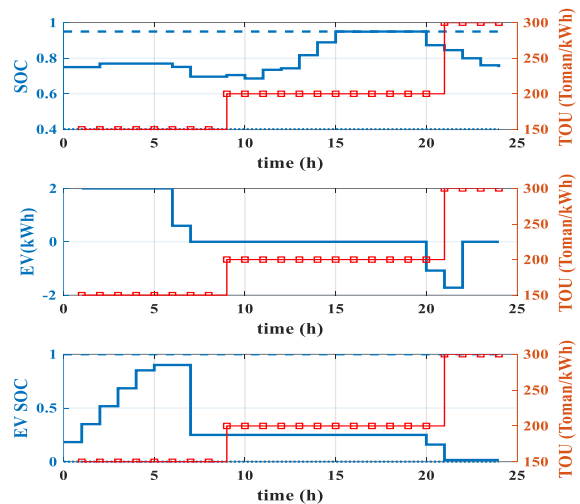
۳.۵. تحلیل حساسیت مسئله نسبت به سطح شارژ اولیه ذخیره‌ساز

سطح شارژ اولیه باتری درواقع مشخص می‌کند که باتری دارای چه میزان انرژی و فضای خالی جهت شارژ می‌باشد. در تمامی موردهای مطالعاتی مقدار سطح شارژ اولیه باتری از مقدار ۵۵ درصد تا مقدار ۹۰ درصد گام به گام تغییر کرده‌است تا مشخص شود، بستگی به این شرط اولیه چه تأثیری در نتایج می‌تواند داشته‌باشد.

۱.۳.۵. بررسی باتری در مورد مطالعاتی ۱

در مورد مطالعاتی ۱ تعرفه قیمت از نوع ثابت است. نتایج مربوط به تحلیل حساسیت این مورد مطالعاتی نیز در شکل ۱۰ و جدول ۵ آمده‌است که در این مورد هم به دلیل ثابت بودن قیمت، نتایج حالات اجبار و اختیار یکسان می‌شوند. مطابق شکل ۱۰ از آنجاییکه تعرفه

شکل ۷: سطح شارژ درون باتری، خودروی الکتریکی و میزان انرژی خودروی الکتریکی در مورد مطالعاتی ۲ الف

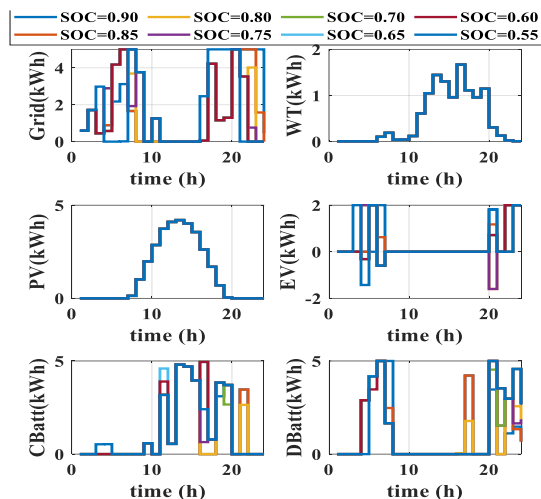


شکل ۷ نشان‌دهنده حالات شارژ باتری و خودروی الکتریکی و همچنین میزان انرژی خودروی الکتریکی می‌باشد. همان‌طور که مشخص است نسبت به مورد مطالعاتی ۱ (قیمت ثابت) میزان استفاده از باتری در ساعات اولیه کمتر بوده و از انرژی برق شبکه که در آن ساعات با توجه به قیمت پایین‌تر، استفاده بیشتری شده‌است.

۲.۲.۵. تعرفه زمان مصرف با حالت اختیار

در این حالت طبق نمودارهای شکل ۸ و ۹ با توجه به اختیار در تصمیم‌گیری برای تأمین انرژی از منابع، زمان‌های کم‌باری و اوج بار اهمیت به‌سزایی پیدا می‌کنند و در راستای تأمین انرژی ارزان‌تر، منبع موردنظر انتخاب می‌شود. به عبارتی، دیگر دلیلی به استفاده حداکثری از منابع تجدیدپذیر نبوده‌است.

شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند که باتری خودروی الکتریکی متفاوت‌تر از قبل عمل کرده و پس از بازگشت به خانه مقداری انرژی می‌گیرد و هنگام نیاز آن را در اختیار خانه قرار می‌دهد. لازمه صرفه‌جویی اقتصادی در این موردهای مطالعاتی این است که اولاً ظرفیت ذخیره‌ساز به‌حدی بزرگ باشد که پاسخگوی ذخیره‌سازی مازاد انرژی باشد و ثانیاً مشتری دارای اختیار در تصمیم‌گیری باشد.



شکل ۱۰: تأثیر سطح شارژ اولیه بر مورد مطالعاتی ۱

جدول ۵: نتایج کمی تحلیل حساسیت در مورد مطالعاتی ۱

SOC	توان شبکه	تجدیدپذیر	هزینه شبکه	هزینه تجدیدپذیر	هزینه کل
0.9	۳۷/۷۸	۴۱/۹۱	۱۴۰۵۷	۸۳۸۲/۶	۲۲۴۳۹/۶
0.85	۳۷/۷۸	۴۱/۹۱	۱۴۰۵۷	۸۳۸۲/۶	۲۲۴۳۹/۶
0.8	۳۷/۷۸	۴۱/۹۱	۱۴۰۵۷	۸۳۸۲/۶	۲۲۴۳۹/۶
0.75	۳۷/۷۸	۴۱/۹۱	۱۴۰۵۷	۸۳۸۲/۶	۲۲۴۳۹/۶
0.7	۳۷/۷۸	۴۱/۹۱	۱۴۰۵۷	۸۳۸۲/۶	۲۲۴۳۹/۶
0.65	۳۷/۷۸	۴۱/۹۱	۱۴۰۵۷	۸۳۸۲/۶	۲۲۴۳۹/۶
0.60	۳۷/۷۸	۴۱/۹۱	۱۴۰۵۷	۸۳۸۲/۶	۲۲۴۳۹/۶
0.55	۳۷/۷۸	۴۱/۹۱	۱۴۰۵۷	۸۳۸۲/۶	۲۲۴۳۹/۶

جدول ۶: نتایج کمی تحلیل حساسیت در مورد مطالعاتی ۲

SOC	توان شبکه	تجدیدپذیر	هزینه شبکه	هزینه تجدیدپذیر	هزینه کل
0.9	۵۶/۰۶	۲۳/۶۳	۱۲۴۱۰	۴۷۲۷/۰	۱۷۱۳۷/۰
0.85	۵۶/۸۸	۲۲/۸۱	۱۱۷۸۳	۴۵۶۲/۷	۱۶۳۴۵/۷
0.8	۵۶/۸۸	۲۲/۸۱	۱۱۵۳۳	۴۵۶۲/۷	۱۶۰۹۵/۷
0.75	۵۶/۸۸	۲۲/۸۱	۱۱۵۳۳	۴۵۶۲/۷	۱۶۰۹۵/۷
0.7	۵۶/۸۸	۲۲/۸۱	۱۱۵۳۳	۴۵۶۲/۷	۱۶۰۹۵/۷
0.65	۵۶/۸۸	۲۲/۸۱	۱۱۵۳۳	۴۵۶۲/۷	۱۶۰۹۵/۷
0.60	۵۶/۱۰	۲۳/۵۹	۱۲۱۱۲	۴۷۱۹/۰	۱۶۸۳۱/۰
0.55	۳۱/۶۰	۱۶/۰۹	۱۰۷۲۱	۳۲۱۹/۴	۱۳۹۴۰/۴

۲.۳.۵. بررسی باتری در مورد مطالعاتی ۲

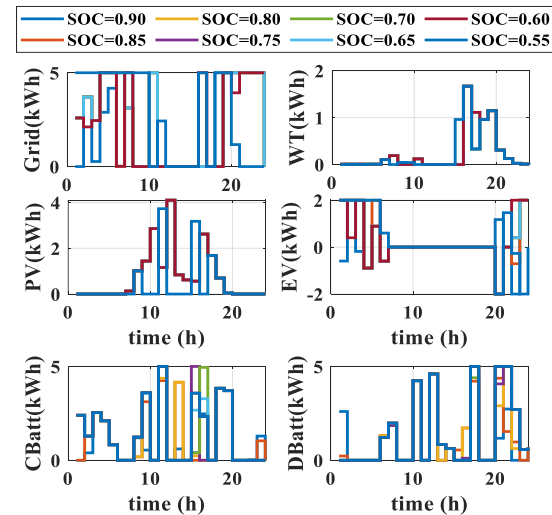
نتایج مربوط به این مورد مطالعاتی نیز در شکل ۱۱ و جدول ۶ آمده- است. در حالت ۲الف که اجبار به دریافت انرژی از منابع تجدیدپذیر وجود دارد همانند بررسی باتری در مورد ۱ می شود.

مطابق شکل ۱۱، سطح شارژهای مختلف منجر به تغییر نتایج شده- است. علت این تفاوت ها حضور تعرفه زمان مصرف است که کاربران را تشویق کرده است تا به صورت حداکثری هم خودروی خود را شارژ کنند و هم باتری خود را شارژ کنند. مسلماً در این شرایط رقابتی مقدار سطح

شارژ اولیه باتری و در واقع ظرفیت آزاد باتری برای جذب توان اهمیت بالایی پیدا خواهد کرد و در نتیجه نتایج متفاوت خواهد شد. با توجه به جدول ۶ می توان دریافت که هرچه سطح شارژ اولیه باتری در حد وسط قرار گرفته باشد، هزینه های تأمین برق منزل کمتر خواهد شد. در اینجا تنها عاملی که می تواند محدودیت باشد، سطح دیماند قراردادی منزل با شبکه است، یعنی در ساعات کم باری کاربر حق ندارد بیشتر از دیماند قراردادی خود (حداکثر توان عبوری مجاز از کنتور خود) برق بکشد.

مراجع

- [۱] R. Tahmasebi and A. Feili, "Developing a Strategy for the Use of the Internet of Things in Shiraz Residential Buildings with a Combined DANP-SWOT Approach," *Intelligent Multimedia Processing and Communication Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 19-30, 2022.
- [۲] N. T. Mbungu, R. C. Bansal, and R. M. Naidoo, "Smart energy coordination of autonomous residential home," *IET Smart Grid*, vol. 2, no. 3, pp. 336-346, 2019.
- [۳] A. Khodakarami, H. F. Farahani, and J. Aghaei, "Stochastic characterization of electricity energy markets including plug-in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 112-122, 2017.
- [۴] F. Luo, G. Ranzi, W. Kong, Z. Y. Dong, and F. Wang, "Coordinated residential energy resource scheduling with vehicle-to-home and high photovoltaic penetrations," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 6, pp. 625-632, 2018.
- [۵] A. Anvari-Moghaddam, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, H. Monsef, and A. Rahimi-Kian, "Efficient energy management for a grid-tied residential microgrid," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 11, pp. 2752-2761, 2017.
- [۶] S. Zhang, P. Huang, and Y. Sun, "A multi-criterion renewable energy system design optimization for net zero energy buildings under uncertainties," *Energy*, vol. 94, pp. ۲۰۱۶, ۲۶۵-۲۵۴, ۲۰۱۶.
- [۷] K. Zhou and L. Cai, "Randomized PHEV charging under distribution grid constraints," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 879-887, 2014.
- [۸] T. Zhang, W. Chen, Z. Han, and Z. Cao, "Charging scheduling of electric vehicles with local renewable energy under uncertain electric vehicle arrival and grid power price," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 6, pp. 2600-2612, 2013.
- [۹] S. Zhang, J. Rong, and B. Wang, "An optimal scheduling scheme for smart home electricity considering demand response and privacy protection," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 132, p. 107159, 2021.
- [۱۰] M. B. Gough, S. F. Santos, T. AlSkaif, M. S. Javadi, R. Castro, and J. P. Catalão, "Preserving privacy of smart meter data in a smart grid environment," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 1, pp. 707-718, 2021.
- [۱۱] R. Zafar, A. Mahmood, S. Razzaq, W. Ali, U. Naeem, and K. Shehzad, "Prosumer based energy management and sharing in smart grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 1675-1684, 2018.
- [۱۲] S. A. Hashmi, C. F. Ali, and S. Zafar, "Internet of things and cloud computing-based energy management system for demand side management in smart grid," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 1, pp. 1007-1022, 2021.



شکل ۱: تأثیر سطح شارژ اولیه بر مورد مطالعاتی ۲

۶ نتیجه‌گیری و تحقیقات آینده

نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی این مقاله نشان می‌دهد که بهره‌گیری از منابع تولید مستقل از قبیل توربین بادی و سلول خورشیدی منجر به خرید برق کمتری از شبکه سراسری می‌شود و هزینه کمتری نسبت به شبکه برق را به خانه هوشمند تحمیل کرده و قیمت قبض برق را کاهش می‌دهد. نتایج حاصل از بهره‌گیری از خودروی الکتریکی نشان‌داد با در نظر گرفتن تعرفه زمان مصرفی کشور ایران در شرایط خرید برق در ساعات کم باری و استفاده از آن در ساعات اوج مصرف به روش بازگشت انرژی هزینه برق تا ۲۹/۳٪ کاهش می‌یابد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، اگر حالت تعرفه ثابت در نظر گرفته‌شود، حتی با وجود استفاده از خودروی الکتریکی به عنوان منبع ذخیره‌ساز، هزینه کل بیشتر می‌شود، چراکه خودروی الکتریکی باری به بار سنتی شبکه می‌افزاید که حتی ممکن است باعث رشد تصاعدی قیمت برق مصرفی شود. لذا در این شرایط، تنها مزیت استفاده از خودروی هوشمند به عنوان ذخیره‌ساز این است که نظیر یک منبع افزونه مورد استفاده قرارگیرد و با ذخیره انرژی در ساعات غیر اوج مصرف، راهکار مؤثری در خاموشی احتمالی اوج مصرف و یا قطعی اضطراری برق باشد.

با فراگیر شدن خودروهای الکتریکی در مقیاس شهری و حرکت به سمت شهر هوشمند، به نظر می‌رسد که در آینده نزدیک با حجم وسیعی از منابع ذخیره‌ساز و با ظرفیت بالاتر مواجه‌باشیم. لذا در کارهای آتی درخصوص مشترکان پرمصرف امکان‌سنجی میزان کاهش توان مصرفی از شبکه برق هوشمند در شرایط بهره‌گیری از رهیافت بازگشت انرژی پایدار و مقرون به صرفه خودروهای الکتریکی مجاور پارک‌شده در منطقه که تحت مالکیت این مشترکان نیستند ولی امکان برون‌سپاری انرژی پایدار باشند نیز می‌تواند مورد بررسی قرارگیرد. علاوه بر این امکان‌سنجی بهره‌گیری استفاده از پهنادهای

- vehicles," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, no. 4, pp. 2559-2569, 2020.
- [۱۹] A. Almutairi and S. Alyami, "Load profile modeling of plug-in electric vehicles: Realistic and ready-to-use benchmark test data," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 59637-59648, 2021.
- [۲۰] J. Zhao, X. Xi, Q. Na, S. Wang, S. N. Kadry, and P. M. Kumar, "The technological innovation of hybrid and plug-in electric vehicles for environment carbon pollution control," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 86, p. 106506, 2021.
- [۲۱] T. Aldhanhani, M. Shaaban, A. Al-Durra, E. El-Saadany, and H. Zeineldin, "Plug-in electric vehicles smart charging mechanisms for cost minimization and ancillary service provision," *The Journal of Engineering*, vol. 2021, no. 3, pp. 166-176, 2021.
- [۲۲] A. Kumari *et al.*, "Blockchain-Based Peer-to-Peer Transactive Energy Management Scheme for Smart Grid System," *Sensors*, vol. 22, no. 13, p. 4826, 2022.
- [۲۳] "Greater Tehran electric power distribution company," <https://tbtd.ir/taarefeh>.
- [۱۳] M. Zarei and Z. Saadati, "Solving the Multi-Objective Problem of IoT Service Placement in Fog Computing Using Reinforcement Learning Approaches," *Intelligent Multimedia Processing and Communication Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 29-41, 2023.
- [۱۴] M. Tostado-Véliz, R. S. León-Japa, and F. Jurado, "Optimal electrification of off-grid smart homes considering flexible demand and vehicle-to-home capabilities," *Applied Energy*, vol. 298, p. 117, ۱۸۴, ۲۰۲۱.
- [۱۵] S. Molleti and M. Armstrong, "Smart energy harvesting performance of photovoltaic roof assemblies in Canadian climate," *Intelligent Buildings International*, vol. 13, no. 1, pp. 70-88, 2021.
- [۱۶] S. S. Shuvo and Y. Yilmaz, "Home Energy Recommendation System (HERS): A Deep Reinforcement Learning Method based on Residents' Feedback and Activity," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022.
- [۱۷] P. Vasant, J. A. Marmolejo, I. Litvinchev, and R. R. Aguilar, "Nature-inspired meta-heuristics approaches for charging plug-in hybrid electric vehicle," *Wireless Networks*, vol. 26, no. 7, pp. 4753-4766, 2020.
- [۱۸] B. Vaidya and H. T. Mouftah, "IoT applications and services for connected and autonomous electric

پی‌نوشت

⁸ Electric vehicles

⁹ Markov decision process

¹⁰ Smart grid

¹¹ Transactive Energy Management

¹² Peer-to-Peer

¹³ Greater Tehran electric power distribution company

¹⁴ Toman unit

¹ State of charge

² Home energy management system

³ Residential energy resource

⁴ Energy management system

⁵ Branch and bound

⁶ Net zero energy buildings

⁷ Plug-in Hybrid Electrical Vehicles