

الگوریتمی ترکیبی بر پایه روش‌های هوش محاسباتی جهت مدیریت مصرف برق خانگی با حضور خودروی برقی

مرتضی رجبی مندی^۱، دانشجوی دکتری؛ محمدابراهیم حاجی‌آبادی^۲، استادیار؛ مجید بقائی‌نژاد^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه حکیم سبزواری- سبزوار- ایران - m.rajabimendi@hsu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه حکیم سبزواری- سبزوار- ایران - me.hajjabadi@hsu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه حکیم سبزواری- سبزوار- ایران - mbnejad@hsu.ac.ir

چکیده: در این مقاله با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی هوشمند روشی برای مدیریت مصرف برق خانگی مناسب جهت پیاده‌سازی در بستر شبکه برق هوشمند برق مطرح گردیده است. هدف اصلی این مقاله ارائه روشی جهت مدیریت مصرف برق بخش خانگی با حضور خودروی برقی می‌باشد. برای رسیدن به این هدف در گام اول، یک مدل برای مدیریت مصرف برق وسایل خانگی با هدف حداقل‌سازی هزینه خانوار و با در نظر گرفتن پارامتر رفاه ارائه گردیده است. در گام دوم به مدل‌سازی برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP) و بررسی امکان تبادل انرژی بین خودروی برقی و شبکه برق تحت این برنامه پرداخته شده است. در گام سوم، مساله برنامه‌ریزی شارژ خودروی برقی در برنامه مدیریت مصرف برق به صورت تطبیقی و احتمالاتی بررسی شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده با سناریوی مشخص نشان‌دهنده کاهش ۶۰/۹۶ درصدی مصرف انرژی در مدیریت مصرف برق وسایل خانگی و نیز زمان‌بندی بهینه شارژ خودروی الکتریکی می‌باشد. همچنین در قسمت پاسخ‌گویی بار اضطراری در مقایسه دو سناریوی متفاوت مقدار ۶۶/۷۷٪ هزینه مشتری و پیک بار مقدار ۱ کیلووات به ازای هر خانه کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت مصرف برق، خودروی برقی، برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری، تبادل انرژی، هوش محاسباتی

A Hybrid Algorithm based on Computational Intelligence Methods for House Energy Management in Presence of Electric Vehicle

M. Rajabimendi¹, PhD Student; M.E. Hajjabadi², Assistant Professor; M. Baghaei Nejad³, Assistant Professor

1- Electronics and Computer Engineering Department, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran, Email: m.rajabimendi@hsu.ac.ir

2- Electronics and Computer Engineering Department, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran, Email: me.hajjabadi@hsu.ac.ir

3- Electronics and Computer Engineering Department, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran, Email: mbnejad@hsu.ac.ir

Abstract: This paper has proposed an energy management system for domestic house applications considering electric vehicle. The first step is linked to optimal and adaptive scheduling of appliances and is defined as a multi objective function model with some fuzzy coefficient and owner comfort factors. The important aspect of this tool is to help customers respond to real time electricity price. In the second step, emergency demand response program (EDRP) modeling and the possibility of energy exchange has been investigated. In the third step, the electric vehicle charging planning has been investigated as adaptive and uncertainty. In energy management part, specific scenarios is simulated which reflect 60.96% of energy consumption reduction and the optimal scheduling of electric vehicle charging too. In the emergency demand response part two specific scenarios are simulated which reflect 66.77% of energy consumption reduction and peak shaving of 1 kW per house.

Keywords: Energy management system (EMS); electric vehicle; emergency demand response program; energy exchange; computational intelligence methods

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۴ و ۱۳۹۶/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۱

نام نویسنده مسئول: مجید بقائی‌نژاد

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سبزوار - توحید شهر - دانشگاه حکیم سبزواری - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

امروزه شرکت‌های برق در سراسر جهان با مشکلات بسیاری مواجه هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به تلفات توان سنگین، افزایش تقاضای برق، کم‌بود سوخت و انرژی و آلاینده‌های زیست‌محیطی اشاره کرد [۱]. افزایش تقاضا برای انرژی الکتریکی باعث شده است که مشکلات جدی برای شرکت‌های برق به‌وجود آید. با توجه به گزارش وزارت انرژی انگلیس در طول ۲۰ سال گذشته تقاضا و مصرف برق به‌طور مداوم ۲/۵٪ در سال افزایش یافته است [۲]. همچنین گزارش‌ها نشان می‌دهد بیش‌ترین افزایش تقاضای انرژی جهانی در بخش تقاضای برق بوده طوری که انتظار می‌رود میانگین رشد مصرف جهانی برق در طول سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۵۰ به اندازه ۱۱۵٪ افزایش یابد [۳].

این افزایش در تقاضای برق باعث شده است که مسائل تراکم جدی شبکه و چند خاموشی اصلی در سال‌های اخیر به‌وجود آید و مسئله مدیریت مصرف برق جدی‌تر مطرح گردد. یک مطالعه که توسط گروه "Brattle" انجام شده تخمین می‌زند که کاهش ۵ درصد مصرف در اوج تقاضا در سال می‌تواند ۱۰ میلیارد دلار در سال صرفه‌جویی کند [۴]. در این مقاله نگاهی متفاوت و نوآورانه به مسئله مدیریت مصرف برق بخش خانگی شده است طوری که در مدل‌سازی منحصر به فرد ارائه شده (که بر اساس رفاه خانوار می‌باشد) از سیستم فازی استفاده شده است تا رفاه منطقی خانوار فراهم آورده شود. همچنین خودروی برقی به‌عنوان یک بار بزرگ شبکه در نظر گرفته شده و تلاش شده است با مدل‌سازی برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری از پتانسیل موجود در خودروهای برقی جهت پیک‌سایبی شبکه برق استفاده شود که این موضوع و نوع مدل‌سازی آن از جمله موارد نوآوری این مقاله می‌باشد و آن‌را از سایر پژوهش‌ها متمایز ساخته است. در تمام مراحل طراحی الگوریتم پیشنهادی تلاش شده است تا رفاه خانوار در نظر گرفته شود طوری که مشتری انگیزه کافی برای مشارکت در برنامه را داشته باشد. با استفاده از این روش انتظار می‌رود هزینه مصرف برق خانوار کمینه شود و نیز اهداف مشارکت خودروی برقی در پیک‌سایبی شبکه برق محقق شود.

۱-۱- مروری بر ادبیات موضوع

در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه مسئله پاسخ به تقاضا در سیستم قدرت و به‌خصوص در شبکه هوشمند برق انجام شده است. ایده شبکه هوشمند برق با کنترلهای پیشرفته (AMI) آغاز شد تا بتواند مدیریت سمت تقاضا، افزایش بهره‌وری انرژی، و ایجاد شبکه‌ای با قابلیت پاسخ به خطا و بازیابی را تحقق بخشد [۵]. مقالات متعددی در مورد این کنترلهای پیشرفته نگارش یافته است [۸-۱۰]. شبکه هوشمند برق تنها با AMI پایان نمی‌پذیرد و بررسی‌ها در مورد آن ادامه دارد. در چند سال اخیر تحقیقات بر روی قسمت خانگی شبکه هوشمند متمرکز شده است [۹-۱۳]. در زمینه برنامه‌ریزی مصرف برق در بخش خانگی نیز مقالاتی نگارش شده است [۱۴-۱۶].

در [۹] یک الگوریتم هوشمند مدیریت مصرف انرژی خانگی (HEM)

برای وسایل پرمصرف خانگی ارائه شده است. این الگوریتم بارهای خانگی را با در نظر گرفتن دو معیار اولویت و میزان استراتژیک بودن آن‌ها، که از پیش تعیین می‌شوند و همچنین سطح توان مصرفی مجاز مدیریت می‌کند.

در [۱۳] نویسندگان معتقدند برنامه‌ریزی مدیریت مصرف خانه مسئله‌ای است که با دو نوع وسایل خانگی سروکار دارد؛ دسته اول وسایلی با استفاده مقطعی مانند تلویزیون و کامپیوتر و دسته دوم وسایلی با استفاده مستمر مانند یخچال و گرماسازها. روش پیشنهادی آن مقاله الگوریتمی برای مدیریت مصرف انرژی خانه می‌باشد که در آن بازار عرضه و تقاضا و پارامتر راحتی و آسایش را در نظر گرفته‌اند.

در [۱۷] به برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی با توجه به مسافرت‌های خودروهای برقی پرداخته شده است. کاهش تلفات، کاهش انرژی خریداری شده از شبکه اصلی، کاهش کلیدزنی، کاهش انرژی فروخته نشده و کاهش مدت زمان اتصال ریزش‌بکه به شبکه اصلی از اهداف این مسئله بوده که با استفاده از الگوریتم EPSO و در سناریوهای مختلف به بهینه‌سازی آن پرداخته شده است.

در [۱۸] یک مدل برای بررسی تأثیر خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه بر روی شبکه توزیع مسکونی ارائه شده است. به‌منظور ارزیابی تأثیر این خودروها بر روی شبکه توزیع، مشخصات آن‌ها شامل ظرفیت باتری، مشخصه حالت شارژ و مقدار انرژی مورد نیاز برای شارژ باتری در نظر گرفته شده است. در آن مقاله به‌منظور کاهش مقدار بیشینه بار، تلفات و نسبت بیشینه به متوسط بار برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برنامه‌های پاسخ‌گویی بار باعث کاهش مقدار پیک بار، تلفات و نسبت پیک بار به متوسط بار می‌شود.

در مراجع [۱۹-۲۵] به بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی کار تجهیزات هوشمند خانگی به‌منظور حداقل کردن هزینه برق پرداخته شده است. مدل ریاضی مسئله، بهینه‌سازی از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی بوده که بر اساس آن جابه‌جایی بهینه زمان کارکرد تجهیزات خانگی از دوره‌های زمانی اوج بار شبکه به دوره‌های زمانی کم باری شبکه تعیین شده است. مسئله بهینه‌سازی بررسی شده از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی [۱۹-۲۱] الگوریتم ژنتیک [۲۲] و تئوری بازی‌ها [۲۳] است.

در [۲۱] از روش قیمت‌گذاری زمان استفاده در محاسبه هزینه برق استفاده شده است؛ در حالی که در [۱۹، ۲۰، ۲۲، ۲۳] روش قیمت‌گذاری زمان حقیقی مورد استفاده قرار گرفته است. در [۲۴] به بحث در مورد صرفه اقتصادی استفاده از تجهیزات هوشمند خانگی، با توجه به تعرفه‌های مختلف بر هزینه برق مشترکین و همچنین میزان سرمایه‌گذاری لازم برای تهیه تجهیزات هوشمند خانگی پرداخته شده است.

با بررسی مقالات و پژوهش‌های صورت گرفته مشاهده می‌شود با وجود پژوهش‌های فراوان در زمینه مدیریت مصرف بخش خانگی، به مدل‌سازی رفاه منطقی خانوار طوری که شرایط خانه، محیط و شبکه در

صورت که از یک شبکه ANFIS برای محدود کردن سطح شارژ خودروها در ساعات پیک شبکه استفاده شده است.

۳-۱- ساختار پژوهش

در ادامه مقاله در بخش دوم مساله مدیریت مصرف برق خانوار مدل‌سازی شده است. در بخش سوم برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری با قابلیت مشارکت خودروی برقی مدل‌سازی شده است. در بخش چهارم مساله برنامه‌ریزی شارژ خودرو به صورت احتمالاتی و در نظر گرفتن شرایط پیک شبکه ارائه شده است. در بخش آخر نیز با در نظر گرفتن سناریوی خاص شبیه‌سازی و نتایج آن ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی مدیریت مصرف برق خانگی

در این بخش به بررسی تعریف و مدل‌سازی مساله مدیریت مصرف برق خانگی پرداخته شده است. جهت این منظور دو گام اساسی برداشته شده است. در گام اول از چند سیستم فازی برای برآورد درجه‌ای از توصیه برای استفاده از هر کدام از لوازم خانگی با توجه به شرایط محیط خانه، محیط بیرون و شرایط شبکه استفاده شده است. همچنین یک ضریب "رفاه خانوار" در نظر گرفته شده است که توسط مشتری تعیین می‌شود. در گام دوم به مدل‌سازی مساله بهینه‌سازی مصرف برق خانوار پرداخته شده است.

۲-۱- ضریب رفاه خانوار

روش پیشنهادی بایستی مبتنی بر آسایش خانوار باشد طوری که مشتری برای استفاده از آن تمایل کافی را داشته باشد. برای این منظور ضریب "رفاه خانوار" در نظر گرفته شده است که عددی بین ۰ تا ۳ است که توسط مشتری تعیین می‌شود و نشان دهنده اهمیت استفاده از هر وسیله در زمان‌های مختلف از دید مشتری می‌باشد.

۲-۲- درجه توصیه برای استفاده از لوازم خانگی

برای برآورد میزان مناسب بودن زمان استفاده از هر وسیله با توجه به شرایط محیط، خانه و شبکه از سیستم فازی استفاده شده است. از آنجا که هر وسیله نوع کارکرد متفاوتی دارد لذا سیستم‌های فازی مختلف با ورودی‌های متفاوت در نظر گرفته شده‌اند. خروجی آن‌ها اعداد بین ۱ تا ۳ است که نشان دهنده درجه‌ای از توصیه برای استفاده از هر وسیله در زمان‌های مختلف شبانه‌روز می‌باشد. خروجی این سیستم فازی و ضریب راحتی خانوار تشکیل ضریبی را می‌دهد که می‌تواند بر نتیجه بهینه‌ساز اصلی تأثیر بگذارد.

۲-۳- پارامترهای مؤثر بر مصرف برق خانوار

پارامترهای متعددی بر مصرف برق خانوار مؤثر است. تعدادی از این پارامترها بر میزان مصرف کل برق خانوار و برخی بر میزان مصرف لوازم مؤثرند. هدف از این قسمت طراحی یک سیستم مدیریت مصرف برق است که قادر به در نظر گرفتن شرایط خانه‌های مختلف باشد. این

نظر گرفته شود پرداخته نشده است. همچنین مساله مشارکت خودروهای برقی در برنامه‌های تشویق محور پاسخ تقاضا نیز به چشم نمی‌خورد که در این مقاله با دیدی نوآورانه به آن‌ها پرداخته شده است. همچنین مساله شارژ هوشمندانه خودروهای برقی طوری که متضمن ارتباطی منطقی بین میزان شارژ خودرو در ساعات پیک شبکه و پارامترهای تصادفی خودروی برقی باشد جزو خلأهای پژوهش‌های گذشته می‌باشد که در این مقاله با ارائه کنترل‌کننده‌ای مبتنی بر شبکه ANFIS این هدف محقق شده است.

۲-۱- هدف، روش، نوآوری

هدف از این مقاله ارائه الگوریتمی هوشمند مبتنی بر روش‌های هوش محاسباتی برای مدیریت مصرف برق خانگی با حضور خودروی برقی، مناسب جهت پیاده‌سازی در بستر شبکه برق هوشمند برق می‌باشد. این روش تعیین‌کننده برنامه‌ریزی استفاده از وسایل خانگی و برنامه‌ریزی شارژ خودروی برقی با هدف کاهش مصرف برق بخش خانگی می‌باشد. همچنین مشارکت خودروی برقی در برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری یک نوآوری و نگاهی متفاوت به مساله مدیریت مصرف برق است که در آن تلاش شده است تا راه‌حلی جدید برای مشارکت خودروی برقی در تحقق اهداف شبکه برق ارائه دهد. در روش پیشنهادی تلاش شده است در تمام مراحل طراحی الگوریتم رفاه خانوار در نظر گرفته شود.

برای رسیدن به این منظور سه گام اصلی برداشته شده است. هدف از گام اول تعریف یک مدل برای مدیریت مصرف لوازم خانگی است که برای این منظور روابطی برای تخمین هزینه انرژی مصرفی هر کدام از لوازم خانگی با توجه به قیمت‌های لحظه‌ای برق و میزان حضور در مدار تعریف شده است. سپس با کمک این روابط مدل بهینه‌سازی مصرف برق خانوار تعیین شده است. برای در نظر گرفتن شرایط محیطی و شبکه برق از چند سیستم فازی استفاده شده است که خروجی آن و ضریبی که برای رفاه مشتری در نظر گرفته شده است تشکیل ماتریس ضرایبی را می‌دهد که می‌تواند بر روی مدل بهینه‌سازی مصرف برق تأثیرگذار باشد. سپس جهت بهره‌مندی از کارایی روش‌های هوش محاسباتی در حل مسائل عدد صحیح مختلط، مساله بهینه‌سازی به کمک الگوریتم PSO حل شده است. از آنجا که مساله به صورت برنامه‌ریزی روز بعد می‌باشد نگرانی از بابت زمان اجرای آن در مقایسه با روش‌های ریاضی وجود ندارد. در گام دوم جهت تحقق مشارکت خودروهای برقی در پیک‌سایبی شبکه، برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری با امکان تبادل انرژی خودروی برقی مدل‌سازی شده است. در این مدل با مشارکت خودروی برقی امکان پیک‌سایبی در شرایط اضطراری شبکه با ملاحظه رفاه مشتری محقق شده است. در گام سوم مساله برنامه‌ریزی شارژ خودروی برقی به صورت احتمالاتی و تطبیقی مدل‌سازی شده است. بدین منظور روابطی جهت تخمین انرژی مصرفی شارژ خودرو و هزینه آن به صورت احتمالاتی ارائه شده است. سپس با استفاده از این روابط مدل بهینه‌سازی شارژ خودروهای برقی ارائه شده است. این مدل به صورت تطبیقی است به این

۲-۵- مدل‌سازی مساله بهینه‌سازی مصرف انرژی

مساله مدیریت مصرف انرژی می‌تواند به صورت یک مساله بهینه‌سازی بیان شود. رفتار مشتری غالباً به این صورت است که تمایل دارد رفاه خانوار بیشینه شود طوری که هزینه انرژی مصرفی کمینه باشد. در این جا رفاه مشتری به این صورت تعریف می‌شود که وسایل خانگی در زمان‌های مناسب قابل استفاده باشند مثلاً اگر سیستم مدیریت انرژی نیمه‌شب را برای کارکرد وسیله‌ای انتخاب کند و این با سبک زندگی خانوار مطابق نباشد می‌توان گفت رفاه خانوار کم شده است. بنابراین در روش پیشنهادی ماتریس ضرایب شامل ضریب راحتی خانوار و ضریب توصیه استفاده از لوازم تعریف شده است تا بر روی نتایج سیستم مدیریت انرژی تأثیر گذار باشد. با توجه به این توضیحات تابع هدف مساله را می‌توان به صورت تابع بیشینه‌سازی رفاه خانوار تعریف کرد. لازم به ذکر است در این جا این تابع هدف به جای یک تابع به صورت چند تابع هدف تعریف شده است تا هر وسیله امکان حضور در یک محدوده مناسب را داشته باشد. مثلاً وسایل خانگی مرتبط با زمان صبح در تابع هدف G_1 آورده شده‌اند بنابراین اساساً امکان انتخاب شدن برای کارکرد در زمان‌های دیگر وجود نخواهد داشت و این یک گام به سوی رفاه خانوار می‌باشد. تابع G_5 مربوط به وسایلی است که دوره زمان کارکرد مشخصی ندارند.

$$G_1 = \sum_{v=1}^7 \sum_{u=1}^x \sum_{j=1}^a (V_{u,j}^{v,F.I.S} + V_{u,j}^{v,O.I.F}) X_{u,j}^{v,Morning} \quad (6)$$

$$G_2 = \sum_{v=1}^7 \sum_{u=1}^x \sum_{j=a}^b (V_{u,j}^{v,F.I.S} + V_{u,j}^{v,O.I.F}) X_{u,j}^{v,Lunch} \quad (7)$$

$$G_3 = \sum_{v=1}^7 \sum_{u=1}^x \sum_{j=b}^c (V_{u,j}^{v,F.I.S} + V_{u,j}^{v,O.I.F}) X_{u,j}^{v,Evening} \quad (8)$$

$$G_4 = \sum_{v=1}^7 \sum_{u=1}^x \sum_{j=c}^{24} (V_{u,j}^{v,F.I.S} + V_{u,j}^{v,O.I.F}) X_{u,j}^{v,Night} \quad (9)$$

$$G_5 = \sum_{v=1}^7 \sum_{u=1}^x \sum_{j=1}^{24} (V_{u,j}^{v,F.I.S} + V_{u,j}^{v,O.I.F}) X_{u,j}^{v,Variable\ time} \quad (10)$$

در روابط (۶) تا (۱۰)، $V_{u,j}^{v,O.C.F}$ و $V_{u,j}^{v,F.I.S}$ ضرایب رفاه خانوار و درجه مناسب بودن زمان استفاده برای وسیله u در بخش زمانی z ام و روز v ام می‌باشد. همچنین ماتریس $X_{u,j}^{v,Morning}$ نشان دهنده وضعیت کارکرد وسیله u ام در بخش زمانی z ام و در زمان صبح روز v ام می‌باشد. مدل بهینه‌سازی مدیریت انرژی توصیف شده در قسمت قبل دارای محدودیت‌هایی است که در ادامه توضیح داده شده‌اند.

۲-۵-۱- محدودیت کارکرد پیوسته

تعدادی از لوازم دارای محدودیت کارکرد پیوسته می‌باشند. این موضوع در رابطه زیر نشان داده شده‌اند:

$$X_u(t_s) = 1 \rightarrow X_u(t_s, t_{s+1}, \dots, t_e) = 1 \quad (11)$$

رابطه فوق به این معناست که اگر وسیله u ام در زمان t_s شروع به کار کند بایستی تا زمان t_e کارکرد پیوسته داشته باشد.

پارامترها عبارتند از: اندازه خانه، میزان تحصیلات خانوار، تعداد اعضای خانوار، درجه شهرنشینی، تمایل مشتری به کاهش مصرف و قیمت انرژی‌های جای‌گزین [۲۶-۳۰].

۲-۴- مدل‌سازی هزینه برق مصرفی خانوار

برای مدل‌سازی مساله بهینه‌سازی مصرف برق خانوار ابتدا در این قسمت انرژی مصرفی لوازم و هزینه آن مدل‌سازی شده است. لازم به ذکر است برای محاسبات این قسمت از قیمت‌های لحظه‌ای برق (R.T.P) استفاده شده است و از آن جا که این قیمت‌ها در طول شبانه‌روز و نیز روزهای مختلف سال تغییر می‌کنند لازم است بازه زمانی شبانه‌روز به تقسیمات قابل قبول تقسیم شود. برای محاسبه انرژی مصرفی تجهیز u ام در مدت‌زمان خاص رابطه (۱) ارائه شده است.

$$W_{u,j}^v = P_u \times X_{u,j}^k \times \frac{t}{3600} \quad \forall (u \in A, j \in T, k \in M) \quad (1)$$

که در آن، $A = [1, 2, \dots, m]$ مجموعه لوازم خانگی $T = [1, 2, \dots, m]$ مجموعه تقسیمات زمانی و $M = [1, 2, \dots, 30]$ مجموعه روزهای ماه است. $W_{u,j}^v$ انرژی مصرفی تجهیز u ام در زمان z ام از روز v ام و P_u توان مصرفی وسیله u ام می‌باشد. همچنین $X_{u,j}$ یک متغیر باینری برای نشان دادن حضور یا عدم حضور وسیله u ام در بخش زمانی z ام از روز v ام می‌باشد و پارامتر t طول هر بخش از تقسیمات زمانی می‌باشد. برای محاسبه انرژی مصرفی تجهیز u ام در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$W_{u,v} = \sum_{j=1}^m W_{u,j}^v = \sum_{j=1}^m P_u \times X_{u,j}^v \times \frac{t}{3600} \quad \forall (u \in A, j \in T, v \in M) \quad (2)$$

در این رابطه $W_{u,v}$ انرژی مصرفی تجهیز u ام در طول روز v ام می‌باشد. برای محاسبه انرژی مصرفی هر کدام از وسایل خانگی در طول یک هفته رابطه زیر ارائه شده است:

$$W_u^{Weekly} = \sum_{v=1}^7 W_{u,v} = \sum_{v=1}^7 \sum_{j=1}^m P_u \times X_{u,j}^v \times \frac{t}{3600} \quad \forall (u \in A, j \in T, v \in W) \quad (3)$$

در این رابطه W_u^{weekly} و $W_{u,v}$ انرژی مصرفی روزانه و هفتگی می‌باشد. همچنین W مجموعه روزهای هفته می‌باشد. انرژی مصرفی خانه در طول هفته از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W_v^{Optimization} = \sum_{u=1}^x W_u^{Weekly} = \sum_{u=1}^x \sum_{v=1}^7 \sum_{j=1}^m P_u \times X_{u,j}^v \times \frac{t}{3600} \quad \forall (u \in A_c, j \in T, v \in W) \quad (4)$$

هزینه برق مصرفی خانوار در طول هفته از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_v^{Optimization} = \left(\sum_{u=1}^x \sum_{v=1}^7 \sum_{j=1}^m P_u \times X_{u,j}^v \times \frac{t}{3600} \times c \right) \quad (5)$$

1000

۲-۵-۲- سهمیه مصرف انرژی

هر یک از وسایل سهمیه مصرف انرژی مشخصی در طول هفته دارند که به صورت رابطه (۱۲) نشان داده شده است.

$$\sum_{v=1}^7 \sum_{j=1}^m W_{u,j} \leq W_u^{Individual} \quad (12)$$

در این رابطه $W_u^{Individual}$ سهمیه مصرف هفتگی وسیله u می‌باشد. رابطه فوق به صورت هزینه می‌تواند بیان شود و همچنین اگر پارامترهای مؤثر بر مصرف برق که در قسمت ۲-۳ توضیح داده شده است در نظر گرفته شوند روابط (۱۳) تا (۱۵) به دست می‌آیند.

$$\sum_{v=1}^7 \sum_{j=1}^m W_{u,j} \times c \leq (W_u^{Individual} \cdot c)(1 + \gamma_u) \quad (13)$$

$$\sum_{v=1}^7 \sum_{j=1}^m C_{u,j} \leq (C_u^{Individual})(1 + \gamma_u) \quad (14)$$

$$\sum_{v=1}^7 \sum_{j=1}^m C_{u,j} \leq C_u^{adaptive} \quad (15)$$

در این روابط $C_u^{Individual}$ و $C_u^{adaptive}$ سهمیه هزینه و سهمیه هزینه تطبیقی وسیله u می‌باشد. همچنین γ_u ضریب تطبیق انرژی مصرفی و عددی بین ۰ تا ۱ است.

۲-۵-۳- مجموع هزینه

مجموع هزینه برق مصرفی خانوار بایستی محدود به مقداری مشخص باشد و اگر پارامترهای مؤثر بر مصرف برق که در قسمت ۲-۳ توضیح داده شده‌اند نیز در نظر گرفته شود رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sum_{u=1}^x C_u^{adaptive} \leq (1 + \delta) \times C_{base} \quad (16)$$

در این رابطه C_{base} هزینه پایه برق مصرفی خانوار و δ ضریب تطبیق هزینه برق مصرفی خانوار و عددی بین ۰ تا ۱ است.

۳- پاسخ‌گویی بار اضطراری با مشارکت خودروی برقی

در این مقاله جهت ارتقای اهداف سیستم مدیریت انرژی خانگی و نیز افزایش قابلیت اطمینان سیستم در موارد اضطراری قراردادهای "پاسخ‌گویی بار اضطراری" که مشتری با شرکت برق منعقد می‌نماید در نظر گرفته شده‌اند. در برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP) به مصرف‌کنندگان بابت قطع یا کاهش بار در حوادث اضطراری و مواقعی که قابلیت اطمینان سیستم در خطر است پاداش پرداخت می‌گردد. همچنین در این روش می‌توان جریمه‌ای برای شرکت‌کنندگان در صورت کم نکردن مصرف‌شان در مواقع اضطراری در نظر گرفت [۳۱]. در این مقاله از آنجا که مدیریت مصرف انرژی خانگی در حضور خودروهای برقی انجام می‌گیرد جهت ارتقای رفاه خانوار و افزایش انگیزه جهت مشارکت در این گونه برنامه‌ها از انرژی ذخیره‌شده در خودروی برقی جهت تأمین تمام یا بخشی از انرژی مورد نیاز خانوار در این ساعات بهره گرفته شده است. در ادامه مدل‌سازی برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری با

حضور خودروی برقی و رفتارهای متفاوت مشتری پس از دریافت EDRP بررسی می‌شود.

۳-۱- حالت اول: عدم پیروی از EDRP

در اولین گام از مدل‌سازی برنامه EDRP حالتی در نظر گرفته می‌شود که مشتری با دریافت فرمان به هر دلیلی از جمله مثلاً عدم حضور خودرو برقی یا ناکافی بودن شارژ اقدام به کاهش بار خود نکند (و یا اقدام کامل نکند). به طور کلی هزینه مشتری در این برنامه از دو قسمت تشکیل می‌شود یک هزینه ناشی از مدت زمان اجرای EDRP و دیگری هزینه قبل یا پس از اتمام این برنامه که طبق معمول مطابق با قیمت‌های لحظه‌ای خواهد بود. همچنین میزان برگشت انرژی از خودرو به شبکه از هزینه مشتری کم خواهد شد. این موضوع در رابطه (۱۷) نشان داده شده است. مقدار هزینه روزانه برق خانوار در مدت زمان اجرای EDRP و در حالتی که انرژی مصرفی خانوار از مقدار قرارداد بیش‌تر شود، از رابطه (۱۸) قابل محاسبه است.

$$C_{EDRP}^{total} = \sum_{v=1}^7 C_{EDRP}^v - C_{v2g}^v \quad (17)$$

$$C_{EDRP}^v = P_{EDRP,lim}^v \times \frac{t}{3600} \times C_{R.T.P} + \left[\left(\sum_{u=1}^x \sum_{j=1}^n P_u \times X_{u,j} \right) - P_{EDRP,lim}^v \right] \times \frac{t}{3600} \times C_{pen} \quad \forall (u \in A, j \in T, v \in W) \quad (18)$$

در روابط فوق C_{EDRP}^{total} هزینه کل خانوار در روزهای اجرای برنامه، C_{EDRP}^v هزینه برق مصرفی در زمان اجرای برنامه است. همچنین $P_{EDRP,lim}^v$ توان قراردادی برنامه، C_{pen} هزینه جریمه ناشی از عدم اجرای برنامه می‌باشد. اگر با کمک گرفتن از رابطه (۳) بخش ۲-۴ هزینه برق به صورت هفتگی بازنویسی شود رابطه (۱۹) به دست می‌آید. در این رابطه C_{EDRP}^{total} هزینه برق مصرفی در هفته‌ای که در آن برنامه اجرا می‌شود، $W_{vehicle,sale}^j$ انرژی بازگردانده شده به شبکه از طریق خودرو برقی و C_{sale} نرخ فروش برق به شبکه می‌باشد.

$$C_{EDRP}^{total} = \frac{\sum_{v=1}^7 \left[P_{EDRP,lim}^v \times \frac{t}{3600} \times C_{R.T.P} + \left(\sum_{u=1}^x \sum_{j=1}^n P_u \times X_{u,j} \right) - P_{EDRP,lim}^v \right] \times \frac{t}{3600} \times C_{pen} + \sum_{u=1}^x \sum_{j=n+1}^m P_u \times X_{u,j}^v \times \frac{t}{3600} \times C_{R.T.P} - \sum_{q=1}^o \sum_{j=1}^m W_{vehicles,sale}^j \times C_{sale}}{1000} \quad \forall (u \in A, j \in T, v \in W, q \in V) \quad (19)$$

در رابطه اخیر اگر $P_{EDRP,lim}^v$ برابر صفر قرار داده شود رابطه هزینه روزهای عادی حاصل می‌شود بنابراین از این رابطه می‌توان برای محاسبه انرژی خانوار در هفته شامل روزهای برنامه و عادی استفاده کرد.

$$C_{total} = \frac{\left(\sum_{u=1}^x \sum_{j=1}^n P_u \times X_{u,j} \times \frac{t}{3600} \times C_{R.T.P} \right) - \left(P_{EDRP,lim}^v \times \frac{t}{3600} \times C_{ben} \right) + \sum_{v=1}^7 \left(\sum_{u=1}^x \sum_{j=n+1}^m P_u \times X_{u,j}^v \times \frac{t}{3600} \times C_{R.T.P} \right) - \sum_{q=1}^o \sum_{j=1}^m W_{vehicls,sale}^j \times C_{sale} + \sum_{q=1}^o \sum_{j=1}^m W_{vehicle,charge}^j \times C_{R.T.P}}{1000} \quad (23)$$

$$\forall (u \in A, j \in T, v \in W, q \in V)$$

در رابطه فوق $W_{vehicle,charge}^j$ انرژی مصرفی جهت شارژ خودروی برقی می‌باشد که در مورد آن در قسمت‌های بعدی مفصلاً بحث خواهد شد.

۴- برنامه‌ریزی شارژ خودرو

۴-۱- مدل‌سازی احتمالاتی خودروی برقی

مدل‌سازی رفتار خودروی برقی در شبکه با دو دسته پارامترهای معین و نامعین سروکار دارد. از دسته پارامترهای نامعین می‌توان به "مسافت روزانه مسافت"، "زمان رسیدن به پارکینگ"، "زمان خروج از پارکینگ" و "زمان توقف در پارکینگ" اشاره کرد. در این مقاله جهت تخمین تابع توزیع مسافت روزانه مسافت با استفاده از داده‌های مرجع [۳۲] با کمک ابزار dfittool در نرم‌افزار متلب تابع توزیع احتمال مناسب که بتواند بیش‌ترین پوشش داده‌ها را داشته باشد انتخاب شده که به‌صورت $u \sim N(48.38, 93.38)$ تخمین زده شده‌اند. همچنین می‌توان با توجه به این تابع توزیع احتمال و مقدار انرژی مورد نیاز خودرو به ازای هر کیلومتر تابع احتمال "توان درخواستی خودرو" را محاسبه کرد. توان مورد نیاز جهت شارژ باتری با توجه به مسافت مسافت روزانه را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد:

$$P_t = D_r \times P_b \quad (24)$$

که در آن، P_t توان مورد نیاز شارژ باتری برای مسافت مسافت روزانه، D_r مسافت مسافت روزانه به کیلومتر و P_b توان مورد نیاز شارژ باتری به ازای مسافت ۱ کیلومتر است. اگر خودرویی با میزان مصرف kWh/km ۰/۱۵ در نظر گرفته شود (در مورد آن در قسمت شبیه‌سازی توضیح داده خواهد شد) تابع احتمال "توان درخواستی خودرو" به‌صورت $v \sim N(7.26, 2.1)$ خواهد بود.

برای به‌دست آوردن دو تابع توزیع احتمال "زمان رسیدن به پارکینگ" و "زمان خروج از پارکینگ" از داده‌های آماری [۳۳] استفاده شده و به‌صورت توابع نرمال تخمین زده شده‌اند. توزیع احتمال "زمان رسیدن به پارکینگ" به‌صورت $x \sim N(20, 9.8)$ و توزیع احتمال "زمان خروج از پارکینگ" به‌صورت $y \sim N(7.40, 16)$ تخمین زده شده است. جهت تخمین توزیع احتمال "زمان توقف در پارکینگ" می‌توان از دو تابع توزیع احتمال "زمان رسیدن به پارکینگ" و "زمان خروج از پارکینگ"

همچنین اگر به رابطه فوق هزینه شارژ خودرو نیز اضافه شود رابطه برق مصرفی کل خانوار حاصل می‌شود که ذیل به آن اشاره شده است:

$$C_{total} = \frac{\left(P_{EDRP,lim}^v \times \frac{t}{3600} \times C_{R.T.P} \right) + \left(\left(\sum_{u=1}^x \sum_{j=1}^n P_u \times X_{u,j} \right) - P_{EDRP,lim}^v \right) \times \frac{t}{3600} + \sum_{v=1}^7 \left(\sum_{u=1}^x \sum_{j=n+1}^m P_u \times X_{u,j}^v \times \frac{t}{3600} \times C_{R.T.P} \right) - \sum_{q=1}^o \sum_{j=1}^m W_{vehicls,sale}^j \times C_{sale} + \sum_{q=1}^o \sum_{j=1}^m W_{vehicle,charge}^j \times C_{R.T.P}}{1000} \quad (20)$$

$$\forall (u \in A, j \in T, v \in W, q \in V)$$

۳-۲- حالت دوم: پیروی مشتری از EDRP

درحالی که انرژی مصرفی خانوار از مقدار قرارداد کم‌تر باشد و یا مقداری از بار خانه از طریق خودروی برقی تأمین شود طوری که نهایتاً انرژی مصرفی از مقدار قرارداد بیش‌تر نشود هزینه برق مصرفی در روز اجرای برنامه از رابطه زیر پیروی خواهد کرد:

$$C_{EDRP}^v = \left(\sum_{u=1}^x \sum_{j=1}^n P_u \times X_{u,j} \times \frac{t}{3600} \times C_{R.P.T} \right) - \left(P_{EDRP,lim}^v \times \frac{t}{3600} \times C_{ben} \right) \quad (21)$$

$$\forall (u \in A, j \in T, v \in W)$$

در این رابطه C_{ben} میزان تشویقی جهت اجرای برنامه می‌باشد. اکنون با به‌دست آوردن هزینه برق مصرفی در مدت زمان اجرای EDRP می‌توان رابطه هزینه هفتگی را نیز به‌دست آورد که در رابطه (۲۲) نشان داده شده است. در این رابطه اگر $P_{EDRP,lim}^v$ برابر صفر قرار داده شود رابطه هزینه روزهای عادی حاصل می‌شود بنابراین از این رابطه می‌توان برای محاسبه انرژی خانوار در هفته شامل روزهای برنامه و عادی استفاده کرد.

$$C_{EDRP}^{total} = \frac{\left(\sum_{u=1}^x \sum_{j=1}^n P_u \times X_{u,j} \times \frac{t}{3600} \times C_{R.T.P} \right) - \left(P_{EDRP,lim}^v \times \frac{t}{3600} \times C_{ben} \right) + \sum_{v=1}^7 \left(\sum_{u=1}^x \sum_{j=n+1}^m P_u \times X_{u,j}^v \times \frac{t}{3600} \times C_{R.T.P} \right) - \sum_{q=1}^o \sum_{j=1}^m W_{vehicls,sale}^j \times C_{sale} + \sum_{q=1}^o \sum_{j=1}^m W_{vehicle,charge}^j \times C_{R.T.P}}{1000} \quad (22)$$

$$\forall (u \in A, j \in T, v \in W, q \in V)$$

همچنین اگر به رابطه فوق هزینه شارژ خودرو نیز اضافه شود رابطه برق مصرفی کل خانوار حاصل می‌شود که در رابطه (۲۳) به آن اشاره شده است.

و P_i توان باقی‌مانده باتری پیش از شارژ، P_{max} بیش‌ترین ظرفیت باتری. در رابطه فوق قید حداقل شارژ باتری لحاظ شد و جهت در نظر گرفتن شرط ظرفیت بیشینه باتری می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$P_y^{vehicle} = \begin{cases} P_y^{vehicle}, & \frac{P_y^{vehicle}}{0.8 \times P_{max}} \leq 1 \\ 0.8 \times P_{max}, & else \end{cases} \quad (27)$$

در زیر رابطه انرژی درخواستی خودروی برقی در یک بازه زمانی ارائه شده است:

$$W_{y,j}^{d,vehicle} = P_y^{vehicle} \times X_{y,j}^d \times \frac{t}{3600} \quad \forall (y \in E, j \in T, d \in W) \quad (28)$$

در رابطه فوق $W_{y,j}^{d,vehicle}$ انرژی مصرفی هر خودرو در طول یک بازه زمانی، $X_{y,j}^d$ عدد باینری نشان دهنده حضور یا عدم حضور خودرو جهت شارژ در بازه زمانی، t طول مدت زمان هر بازه می‌باشد. از آنجایی که معمولاً میزان بار شبکه در سه سطح ساعات غیرپیک شبکه، پیک متوسط و پیک دسته بندی می‌شود لذا روابط شارژ روزانه خودرو نیز بر این اساس مدل‌سازی خواهد شد که در رابطه (۲۹) به آن اشاره شده است. در این رابطه $W_{y,d}$ انرژی درخواستی خودرو در طول شبانه‌روز، $W_{y,j}^{d,vehicle}$ و $W_{y,k}^{d,vehicle}$ و $W_{y,l}^{d,vehicle}$ به ترتیب انرژی درخواستی در طول زمان‌های غیرپیک، پیک متوسط و پیک، $X_{y,j}^d$ و $X_{y,k}^d$ و $X_{y,l}^d$ عدد باینری نشان دهنده حضور یا عدم حضور خودرو جهت شارژ در این ساعات و همچنین $T_{off\ peak}$ و $T_{mid\ peak}$ و $T_{on\ peak}$ مجموعه بازه‌های زمانی در این ساعات می‌باشد.

$$W_{y,d} = \sum_{j=1}^m W_{y,j}^{d,vehicle} + \sum_{k=m+1}^n W_{y,k}^{d,vehicle} + \sum_{l=n+1}^o W_{y,l}^{d,vehicle} \\ = \sum_{j=1}^m P_y^{vehicle} \times X_{y,j}^d \times \frac{t}{3600} + \sum_{k=m+1}^n P_y^{vehicle} \\ \times X_{y,k}^d \times \frac{t}{3600} + \sum_{l=n+1}^o P_y^{vehicle} \times X_{y,l}^d \times \frac{t}{3600} \quad (29) \\ \forall \left(y \in E, j \in T_{off\ peak}, k \in T_{mid\ peak} \right) \\ \left(l \in T_{on\ peak}, d \in W \right)$$

همچنین انرژی درخواستی خودروهای برقی یک مجتمع مسکونی در طول شبانه‌روز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$W_{optimization}^d = \sum_{y=1}^z \sum_{j=1}^m W_{y,j}^{d,vehicle} + \sum_{y=1}^z \sum_{k=m+1}^n W_{y,k}^{d,vehicle} \\ + \sum_{y=1}^z \sum_{l=n+1}^o W_{y,l}^{d,vehicle} = \sum_{y=1}^z \sum_{j=1}^m P_y^{vehicle} \times X_{y,j}^d \\ \times \frac{t}{3600} + \sum_{y=1}^z \sum_{k=m+1}^n P_y^{vehicle} \times X_{y,k}^d \times \frac{t}{3600} \quad (30) \\ + \sum_{y=1}^z \sum_{l=n+1}^o P_y^{vehicle} \times X_{y,l}^d \times \frac{t}{3600} \\ \forall \left(y \in E, j \in T_{off\ peak}, k \in T_{mid\ peak}, \right) \\ \left(l \in T_{on\ peak}, d \in W \right)$$

استفاده کرد. در این صورت این متغیر را به صورت یک توزیع احتمال نرمال و به صورت $z \sim N(11.20, 25.8)$ تخمین زده می‌شود.

۴-۲- سیستم کنترل سطح دسترسی به شارژ

مساله شارژ خودروی برقی یک مساله با ماهیت تصادفی می‌باشد که در صورت کنترل نشدن شارژ خودروهای برقی می‌تواند تهدیدی برای شبکه برق باشد. با این اوصاف نیاز به یک کنترل کننده که بتواند در مواقعی که احتمال شارژ کنترل نشده به خصوص در ساعات پیک شبکه وجود دارد وارد عمل شود احساس می‌شود. در این مقاله سیستم کنترل کننده‌ای مبتنی بر شبکه ANFIS جهت کنترل سطح دسترسی به شارژ در ساعات پیک شبکه طراحی شده است. لازم به ذکر است در ساعات غیرپیک شبکه عمل کنترل شارژ تنها بر عهده سیستم بهینه‌ساز است که در قسمت‌های بعدی به آن اشاره خواهد شد.

۴-۲-۱- ورودی و خروجی شبکه

ورودی‌های این سیستم کنترل کننده دو متغیر تصادفی "توان درخواستی" و "زمان توقف در پارکینگ" می‌باشد که در قسمت قبل در مورد آن‌ها توضیح داده شد. خروجی این سیستم نیز "سطح دسترسی به شارژ در ساعات پیک" می‌باشد. این ضریب عددی بین صفر و یک است که نرخ شارژ خودرو در ساعات پیک را کنترل می‌نماید. برای آموزش شبکه از داده‌های تولید شده به صورت تصادفی استفاده شده است. به این صورت که توابع توزیع احتمالی که به عنوان ورودی‌های شبکه در نظر گرفته شده‌اند را به چند قسمت تقسیم کرده و در هر محدوده اعدادی به صورت تصادفی تولید شده است. این تقسیم‌بندی بر این مبنا است که در یک توزیع نرمال به ترتیب $68/26$ و $95/44$ درصد داده‌ها در فاصله $[-\sigma, \sigma]$ و $[-2\sigma, 2\sigma]$ قرار دارند، و اگر نقطه μ هم یک قسمت فرض شود در مجموع هر تابع توزیع به ۵ قسمت تقسیم شده و در بازه مربوط به هر قسمت به تعدادی کافی اعداد تصادفی تولید شده است.

۴-۳- پیش‌بینی توان درخواستی خودروهای برقی

خودروی برقی می‌تواند در مساله پاسخ‌گویی بار در زمان‌های پیک انرژی به شبکه یا خانه بازگرداند که می‌توان آن را به یک سطح حداکثر محدود کرد که در رابطه زیر بیان شده است.

$$P_s \leq P_{s,max} \quad (25)$$

همچنین معمولاً به این صورت است که جهت طول عمر بیش‌تر باتری حداکثر از ۸۰ درصد ظرفیت باتری استفاده می‌شود و همچنین شارژ باتری همواره از ۱۰ درصد کم‌تر نباید باشد. با در نظر گرفتن این شرایط جهت محاسبه توان مورد نیاز جهت شارژ باتری رابطه زیر ارائه شده است:

$$P_y^{vehicle} = (P_t + P_s) - [P_t - (0.1 \times P_{max})] \quad (26)$$

در این رابطه $P_y^{vehicle}$ توان مورد نیاز شارژ باتری، P_t توان مورد نیاز شارژ باتری برای مسافت مسافرت روزانه، P_s توان قراردادی بازگشت به شبکه

$$C_{y,d} = \frac{\left(\sum_{j=1}^m P_y^{vehicle} \times X_{y,j}^d \times \frac{t}{3600} \times c + \sum_{k=m+1}^n P_y^{vehicle} \times X_{y,k}^d \times \frac{t}{3600} \times c + \sum_{l=n+1}^o P_y^{vehicle} \times X_{y,l}^d \times \frac{t}{3600} \times c \right)}{1000} - \frac{\left(\sum_{l=n+1}^o P_y^{vehicle} \times X_{y,l}^{d,sale} \times \frac{t}{3600} \times c_{sale} \right)}{1000} \quad (31)$$

$$\forall (y \in E, j \in T_{off\ peak}, k \in T_{mid\ peak}, l \in T_{on\ peak}, d \in W)$$

$$C_{optimization}^d = \frac{\left(\sum_{y=1}^z \sum_{j=1}^m P_y^{vehicle} \times X_{y,j}^d \times \frac{t}{3600} \times c + \sum_{y=1}^z \sum_{k=m+1}^n P_y^{vehicle} \times X_{y,k}^d \times \frac{t}{3600} \times c + \sum_{y=1}^z \sum_{l=n+1}^o P_y^{vehicle} \times X_{y,l}^d \times \frac{t}{3600} \times c \right)}{1000} - \frac{\left(\sum_{y=1}^z \sum_{l=n+1}^o P_y^{vehicle} \times X_{y,l}^{d,sale} \times \frac{t}{3600} \times c_{sale} \right)}{1000} \quad (32)$$

$$MIN F = \frac{\left(\sum_{y=1}^z \sum_{j=1}^m P_y^{vehicle} \times X_{y,j}^d \times \frac{t}{3600} \times c + \sum_{y=1}^z \sum_{k=m+1}^n P_y^{vehicle} \times X_{y,k}^d \times \frac{t}{3600} \times c + \sum_{y=1}^z \sum_{l=n+1}^o P_y^{vehicle} \times X_{y,l}^d \times \frac{t}{3600} \times c \right)}{1000} - \frac{\left(\sum_{y=1}^z \sum_{l=n+1}^o P_y^{vehicle} \times X_{y,l}^{d,sale} \times \frac{t}{3600} \times c_{sale} \right)}{1000} \quad (33)$$

در مدل‌سازی‌ها به‌عنوان یک محدودیت در نظر گرفته می‌شود. این کنترل‌کننده باعث خواهد شد شارژ خودروها تا حد امکان در ساعات غیرپیک شبکه انجام شود و در ساعات پیک شبکه دسترسی به شارژ به‌صورت محدود باشد. همانطور که اجماًلاً در قبل توضیح داده شده است هر ایستگاه شارژ خودرو بستگی به نوع کاربری آن می‌تواند دارای یک مقدار قابل ارائه محدود در هر ساعت باشد. بنابراین با مشخص بودن ساعت احتمالی ورود و خروج خودرو و احتمال مقدار توان درخواستی می‌توان مقدار انرژی را که قابل تحویل در ساعات غیرپیک می‌باشد را محاسبه نمود و سپس با توجه به آن مقدار انرژی که ناچاراً بایستی در ساعات پیک تحویل شود را برآورد کرد. این موضوع طبق رابطه زیر ارائه شده است:

$$W_{Peak\ time}^{initial} = W_y^{total} - \left[\left(n_y^{slot, Mean\ peak} + n_y^{slot, off\ peak} \right) \times W_{station}^{slot, max} \right] \quad (34)$$

در این رابطه $W_{Peak\ time}^{initial}$ تمام انرژی باقی‌مانده جهت ساعات پیک شبکه، W_y^{total} انرژی احتمالی مورد نیاز روز بعد، $n_y^{slot, Mean\ peak}$ و $n_y^{slot, off\ peak}$ به‌ترتیب تعداد بازه‌های زمانی حضور خودرو در پارکینگ مجتمع مسکونی در ساعات میان باری و غیرپیک، $W_{station}^{slot, max}$ مقدار بیشینه انرژی قابل تحویل ایستگاه شارژ در هر بازه زمانی می‌باشد. طبق رابطه فوق اگر خودرویی مقدار انرژی درخواستی آن در حدودی باشد که در زمان توقف در پارکینگ در ساعات غیرپیک قابل تحویل باشد دیگر اجازه شارژ در ساعات پیک را نخواهد داشت. از طرف دیگر اگر خودرویی حضور آن در ساعات غیرپیک کم باشد طوری که نتوان انرژی درخواستی را در این بازه‌ها تحویل داد ناچاراً بایستی در ساعات پیک شارژ شود. اما اگر این مقدار توان درخواستی زیاد باشد و از طرفی

از آنجایی که در این مقاله امکان تبادل انرژی بین خودرو و شبکه نیز فراهم شده است در محاسبات انرژی مصرفی که در بالا به آن‌ها اشاره شده است چند بازه زمانی جهت این منظور در نظر گرفته شده است. در این مرحله برای محاسبه هزینه پرداختی شارژ مصرفی بایستی ابتدا انرژی شارژ اضافی که برای برگرداندن به شبکه لحاظ شده بود مجدداً از انرژی کل کم شود.

توجه شود که علت این گونه عمل کردن به این خاطر است که باتری در ساعات غیرپیک که برق ارزان است شارژ و در ساعات پیک که برق گران‌تر است به شبکه برگردانده می‌شود. جهت محاسبه هزینه پرداختی انرژی مصرفی هر خودرو و پارکینگ مجتمع مسکونی در طول شبانه‌روز به‌ترتیب روابط (۳۱) و (۳۲) ارائه شده است.

در این روابط $C_{y,d}$ هزینه پرداختی راننده خودرو بابت شارژ خودرو، $X_{y,l}^{d,sale}$ متغیر باینری نشان دهنده بازه‌های زمانی برگشت انرژی به شبکه و C_{sale} قیمت قراردادی خرید برق می‌باشد.

۴-۴- مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی شارژ خودروی برقی

جهت برنامه‌ریزی شارژ خودرو طوری که بیش‌ترین سطح شارژ با کم‌ترین هزینه انجام شود مساله به‌صورت یک تابع چند هدفه مدل شده است. برای مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی ابتدا هزینه مصرفی شارژ خودروهای برقی مجتمع مسکونی به‌صورت یک تابع کمینه‌سازی و طبق رابطه ۳۳ ارائه شده است.

همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد سیستم کنترل شارژ خودرو دارای یک شبکه ANFIS می‌باشد که خروجی آن سطح دسترسی به شارژ در ساعات پیک شبکه است. خروجی این شبکه به‌عنوان یک ضریب تنظیم‌کننده میزان شارژ که فقط مربوط به ساعات پیک می‌باشد

همچنین همواره در یک بازه زمانی یا عمل شارژ انجام می‌گیرد یا دشارژ و هر دو باهم ممکن نیست. این موضوع در رابطه زیر نشان داده شده است:

$$X_{y,l}^{d,sale} + X_{y,j}^d \leq 1 \quad (41)$$

$$X_{y,l}^{d,sale} + X_{y,k}^d \leq 1 \quad (42)$$

$$X_{y,l}^{d,sale} + X_{y,l}^d \leq 1 \quad (43)$$

۵- شبیه‌سازی و نتایج

جهت ارزیابی روش پیشنهادی شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. برای این منظور یک خانواده چهار نفره در نظر گرفته شده است که رفتار آن در جدول ۱ آورده شده است. طبق سبک زندگی این خانواده زمان کارکرد وسایل خانگی به چهار بازه زمانی تقسیم شده است که در جدول ۲ به آن اشاره شده است.

جدول ۱: الگوی رفتاری خانواده در روز غیر تعطیل

شماره	رفتار	ساعت	تعداد افراد
۱	بیدار شدن از خواب	۵:۳۰ صبح	۴
۲	صرف صبحانه	۶:۳۰ صبح	۴
۳	ترک خانه	۷ صبح	۴
۴	بازگشت فرزندان	۱ بعدازظهر	۲
۵	بازگشت والدین و صرف ناهار	۲:۳۰ بعدازظهر	۲
۶	صرف شام	۹:۳۰ شب	۴
۷	زمان خواب	۱۱ شب	۴

جدول ۲: زمان‌های کارکرد وسایل خانگی

ناحیه زمانی	ساعت	وسایل	مصرف هفتگی	α_1
۱	۶-۸ صبح	کولر و تلویزیون	۱۷/۹۲	۰
۲	۸ صبح تا ۱ بعدازظهر	-	۰	۰
۳	۵-۱ بعدازظهر	کولر، تلویزیون و IT	۳۷/۹۴	۰/۲
۴	۹-۵ بعدازظهر	کولر، تلویزیون، ماشین لباسشویی و IT	۴۴/۲۴	۰/۲
۵	۱۱-۹ بعدازظهر	کولر، تلویزیون، ماشین لباسشویی و IT	۲۷/۳۷	۰/۲
۶	۱۱ بعدازظهر تا ۶ صبح	کولر	۵۳/۹	۰

همچنین تعدادی از پارامترهایی که در مصرف انرژی الکتریکی مؤثر هستند و در بخش ۲-۳ به آن‌ها اشاره شده است در این قسمت مشخص شده‌اند. به‌عنوان نمونه ضریب سطح تحصیلات که مرتبط با وسایل IT می‌باشد اشاره شده است. بقیه پارامترهای که در روابط بخش ۲-۵-۲ اشاره شده‌اند در جدول ۳ به آن‌ها اشاره شده است. همچنین میزان مصرف غیرصحیح خانوار و سهمیه مصرف انرژی هر وسیله مشخص شده‌اند.

برای به‌دست آوردن ضریب توصیه استفاده از لوازم تعدادی سیستم فازی طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین ضرایب راحتی خانوار نیز تعیین شده‌اند. بعد از تعیین این ضرایب مساله با کمک الگوریتم PSO

حضور در ساعات غیرپیک کم باشد منطقی به‌نظر نمی‌رسد که اجازه داشته باشد در ساعات پیک مقدار زیادی شارژ داشته باشد. بنابراین کنترل‌کننده‌ای مبتنی بر شبکه ANFIS برای چنین مواقعی طراحی شده است تا شارژ خودرو در ساعات پیک به‌صورت تطبیقی باشد. اگر میزان انرژی تطبیقی خودرو برای زمان پیک طبق رابطه زیر تعریف شود:

$$W_{peak\ time}^{adaptive} = \alpha_l \times W_{Peak\ time}^{initial} \quad (35)$$

آن‌گاه قید زیر نیز بایستی برقرار باشد:

$$\sum_{l=n+1}^o P_y^{vehicle} \times X_{y,l}^d \times \frac{t}{3600} \leq \alpha_l \times W_{Peak\ time}^{initial} \quad (36)$$

در این رابطه $W_{peak\ time}^{adaptive}$ انرژی تطبیقی زمان پیک، α_l ضریب سطح دسترسی به شارژ در ساعات پیک می‌باشد. هر چند که در مرحله قبل محدودیتی برای شارژ خودرو در ساعات پیک شبکه در نظر گرفته شد اما در ساعات میان باری و غیرپیک شبکه شارژ خودرو با محدودیت مواجه نخواهد بود بلکه در جهت بیش‌تر کردن آن نیز تلاش می‌شود.

این موضوع در رابطه (۳۷) بیان شده است. در این رابطه $W_{battery}^{max}$ بیش‌ترین ظرفیت مجاز باتری خودرو می‌باشد.

$$W_{y,d} - W_{peak\ time}^{adaptive} \leq \sum_{j=1}^m P_y^{vehicle} \times X_{y,j}^d \times \frac{t}{3600} + \sum_{k=m+1}^n P_y^{vehicle} \times X_{y,k}^d \times \frac{t}{3600} \leq W_{battery}^{max} \quad (37)$$

رابطه فوق را می‌توان به‌صورت یک تابع هدف و یک قید نیز بیان کرد که در زیر به آن اشاره شده است:

$$MAX\ G = \sum_{j=1}^m P_y^{vehicle} \times X_{y,j}^d \times \frac{t}{3600} + \sum_{k=m+1}^n P_y^{vehicle} \times X_{y,k}^d \times \frac{t}{3600} \quad (38)$$

الگوریتم بهینه‌سازی تابع هدف فوق را بیشینه خواهد کرد طوری که قید زیر برقرار باشد:

$$\beta \times (W_{y,d} - W_{peak\ time}^{adaptive}) \leq W_{battery}^{max} \quad (39)$$

در قید فوق عبارت $\beta \times (W_{y,d} - W_{peak\ time}^{adaptive})$ گنجانده شده است تا راننده خودرو با مصالحه با پارکینگ مجتمع مسکونی قادر باشد جهت اطمینان با تنظیم β کمی بیش‌تر از انرژی پیش‌بینی شده خود از شبکه انرژی دریافت کند.

همچنین در زمینه دشارژ باتری این قید وجود دارد که اگر باتری در لحظه t بخواهد دشارژ شود بایستی در لحظات قبلی به اندازه کافی شارژ شده باشد.

$$W_t^{sale} = \begin{cases} 1 & (W_{y,d})_t \geq W_{contract} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (40)$$

در این رابطه W_t^{sale} اجازه دشارژ باتری در لحظه t ام، $(W_{y,d})_t$ میزان انرژی در لحظه t ام و $W_{contract}$ انرژی که طبق قرارداد باید به شبکه برگردد.

سریع است که ۸۰ درصد ظرفیت باتری را در طی ۳۰-۱۵ دقیقه شارژ می‌کند. در این جا از شارژ اول که متناسب با کاربری خانگی است استفاده می‌شود. همچنین در این قسمت هر ساعت به شش قسمت ۱۰ دقیقه‌ای تقسیم شده است. انرژی الکتریکی که باتری با شبکه مبادله می‌کند با اعمال بازده باتری محاسبه می‌شود. در این جا با توجه به مرجع [۳۲] مقدار ۰/۹ برای این ضریب در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر اگر باتری این خودرو بخواهد به‌طور کامل شارژ شود باید ۲۶/۶۶ کیلووات از شبکه جذب شود. با توجه به استفاده از شارژ نوع اول در شبیه‌سازی‌ها در صورتی که باتری حداقل ۱۰ درصد شارژ اولیه داشته باشد و بخواهد به ۸۰ درصد برسد حدود ۵/۵ ساعت معادل ۳۳ بازه زمان نیاز دارد.

در این شبیه‌سازی احتمال ساعت ورود و خروج خودروها به پارکینگ به ترتیب ساعت ۵ بعدازظهر و ۹ صبح با مدت توقف ۱۶ ساعت می‌باشد. مسافتی که احتمالاً در روز بعد خواهند پیمود ۶۵ کیلومتر که معادل ۹/۷۵ kWh می‌باشد. همواره سطح شارژ باتری نباید از ۱۰ درصد ظرفیت آن کمتر باشد بنابراین اگر فرض شود خودروها هنگام ورود kWh ۳ شارژ داشته باشند آن‌ها برای روز بعد بایستی حداقل kWh ۹/۱۵ شارژ شود که با احتساب ضریب راندمان شارژ kWh ۱۰/۱۶ از شبکه دریافت خواهد کرد. حداکثر میزان برگشت انرژی به شبکه به kWh ۷ محدود شده است [۳۲] که در طی ۲ ساعت یا ۱۲ بازه زمانی به شبکه برمی‌گردد. اگر این میزان انرژی نیز به مقدار قبلی اضافه گردد حداقل kWh ۱۷/۱۶ انرژی توسط هر خودرو از شبکه جذب می‌شود و نیز سقف اطمینان شارژ برای هر خودرو نهایتاً kWh ۲۱ در نظر گرفته می‌شود. ضریب راندمان برگشت انرژی به شبکه نیز ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود. همچنین ساعتی از شبانه‌روز که قیمت برق بیشتر از ۲/۸ سنت است به‌عنوان ساعات پیک شبکه و از ۲/۴-۲/۸ میان باری و کم‌تر از ۲/۴ به‌عنوان غیرپیک فرض شده است.

جهت اجرای شبیه‌سازی ابتدا شبکه ANFIS اجرا گردیده که نتیجه خروجی آن مقدار صفر یا به عبارتی عدم دسترسی به شارژ در ساعات پیک شبکه می‌باشد (که کاملاً منطقی است زیرا میزان ساعات حضور در ساعات غیرپیک جواب‌گوی این میزان شارژ می‌باشد).

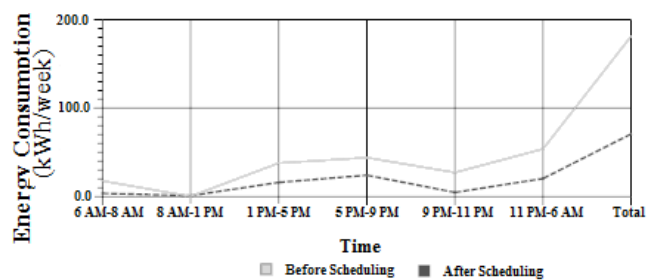
سپس مساله با کمک الگوریتم NSGA II اجرا گردیده است که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده است. در این جدول بازه شماره ۱ به معنای ۱ صبح است و الی آخر.

شبیه‌سازی و حل شده است که نتیجه آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است مجموع انرژی مصرفی هفتگی قبل از بهینه‌سازی ۱۸۱/۳۷ کیلووات ساعت بوده که بعد از اجرای برنامه به مقدار ۷۰/۸۱ کیلووات ساعت رسیده است که نشان‌دهنده بهبود زیادی در کاهش مصرف انرژی بخش خانگی می‌باشد. بنابراین سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی مقدار ۶۰/۹۶٪ کاهش مصرف انرژی داشته است.

جدول ۳: انرژی مصرفی وسایل خانگی

شماره	وسایل خانگی	t	مصرف در هر سیکل	W _{Individual}	W Incorrect
۱	کولر	۳۶۰۰	۱/۱	۶۹/۳	۱۴۶/۳
۲	تلویزیون	۳۶۰۰	۰/۱۸	۵	۱۵/۱۲
۳	ماشین ظرف‌شویی	۳۶۰۰	۱/۲	۶	۸/۴
۴	ماشین لباس‌شویی	۳۶۰۰	۰/۹	۳/۶	۵/۴
۵	IT	۳۶۰۰	۰/۰۷۵	۲/۵۲	۵/۲۵



شکل ۱: - انرژی مصرفی هفتگی پیش و بعد از اجرای روش پیشنهادی

لازم به ذکر است که این نتایج تنها مرتبط با این مورد مطالعاتی بوده و سناریوهای مختلف می‌تواند نتایج متفاوتی داشته باشند.

در گام بعد برای این خانواده یک خودرو الکتریکی "Nissan Leaf" از شرکت نیسان در نظر گرفته شده است که یک خودرو برقی هاجیک ۵ درب با یک باتری لیتیوم-یونی ۳ kWh می‌باشد. این خودرو طبق برنامه رانندگی شهری US LA4 قادر است ۱۶۰ کیلومتر را طی کند که این معادل kWh/km ۰/۱۵ می‌باشد [۳۴].

در مورد انواع شارژ نیز استاندارد نوع اول به‌صورت ۱۶ آمپر و ۲۴۰ ولت و ۳/۳ کیلووات می‌باشد. استاندارد نوع دوم به‌صورت ۷ kW تا ۳ kW (تک‌فاز و سه‌فاز) می‌باشد. در نهایت نوع سوم نوع DC که شارژ

جدول ۴- خروجی کنترل‌کننده ANFIS و ابزار پیشنهادی

	پیک شبکه						میان باری						غیرپیک																								
	بازه زمانی						بازه زمانی						بازه زمانی																								
	۳۷-۴۲	۴۳-۴۸	۴۹-۵۴	-۹۷	-۱۰۳	-۱۰۹	۳۱-۳۶	۵۵-۶۰	۶۱-۶۶	۶۷-۷۲	۹۱-۹۶	-۱۱۵	-۱۲۱	۱-۶	-۷	-۱۳	-۱۹	-۲۵	-۳۱	-۳۷	-۴۳	-۴۹	-۵۵	-۶۱	-۶۷	-۷۳	-۷۹	-۸۵	-۹۱	-۹۷	-۱۰۳	-۱۰۹	-۱۱۵	-۱۲۱	-۱۲۷	-۱۳۳	-۱۳۹
				۱۰۲	۱۰۸	۱۱۴						۱۲۰	۱۲۶		۱۲	۱۸	۲۴	۳۰	۳۶	۴۲	۴۸	۵۴	۶۰	۶۶	۷۲	۷۸	۸۴	۹۰	۹۶	۱۰۲	۱۰۸	۱۱۴	۱۲۰	۱۲۶	۱۳۲	۱۳۸	۱۴۴
ANFIS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NSGAII	↑	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↓	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

کیلووات ساعت انرژی داشته که برای اطمینان ۲۱ کیلووات ساعت شارژ شده است (با استفاده از ضریب β رابطه ۳۹). این خودرو پس از طی مسافت پیش‌بینی شده و مصرف ۱۰/۱۶ کیلووات آن (معادل مسافت پیش‌بینی شده) به خانه برمی‌گردد که از این میزان ۷ کیلووات آن بایستی در زمان‌های ذکر شده به شبکه برگردد که در نتیجه ۳/۸۴ کیلووات آن اضافه است. از آن‌جا که حداقل ۱۰ درصد ظرفیت باتری بایستی باقی بماند لذا با احتساب راندمان ۱/۳ کیلووات قابل تحویل است. بنابراین خودرو می‌تواند ۰/۵۵۵ کیلووات اضافی را جبران نماید. این سناریو در جدول ۵ با "سناریو ۱" نشان داده شده است.

۵-۲- سناریو ۲

همانطور که در بخش ۳ توضیح داده شده است در این برنامه دو حالت ممکن است اتفاق بیافتد یا مشتری از دستور برنامه پیروی کند که در سناریوی ۱ بررسی شد و یا به هر دلیلی از جمله عدم شارژ باتری خودرو از برنامه پیروی نکند. به منظور بررسی حالت عدم پیروی از برنامه، سناریوی دیگری در نظر گرفته می‌شود که خودرو در روز یکشنبه با برنامه‌ای که قبلاً اشاره شد شارژ نشده (شارژ اضافی کافی اشاره شده در رابطه (۳۹) در نظر گرفته نشده باشد) و هنگام برگشت به پارکینگ فقط مقدار ۲/۷۵ کیلووات شارژ اضافی دارد. در این حالت از آن‌جا که در بازه‌های زمانی قبلی نیز خودرو شارژ نشده و ۱۰ درصد ظرفیت باتری باید باقی بماند لذا با احتساب راندمان دشارژ ۰/۳ کیلووات می‌تواند به خانه برق تحویل دهد. بنابراین در این جا خودرو برقی نمی‌تواند جبران ۰/۵۵۵ کیلووات اضافی را بنماید. در این حالت مشتری مایل به کاهش رفاه نیست و تصمیم به عدم پاسخ به برنامه را می‌گیرد که در این حالت مشتری باید جریمه ۰/۲۵۵ کیلووات را بپردازد و نیز پاداشی هم دریافت نخواهد کرد. این حالت با "سناریو ۲" در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- هزینه برق مصرفی خانوار در روز اجرای EDRP

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
سناریو ۱	۰/۲۸	۰/۰۳	۰/۴۷۳	۰	-۰/۳۷۸	-	-۰/۳	۰/۱۰۵
سناریو ۲	۰/۲۸	۰/۰۳	۰/۳۷۳	۰	-۰/۳۷۸	۰/۰۱۱	-	۰/۳۱۶

در جدول ۵ هزینه‌های ۱ تا ۷ به معنای زیر می‌باشد:

- هزینه ۱: هزینه برق مصرفی لوازم خانگی در خارج زمان برنامه
- هزینه ۲: هزینه برق مصرفی لوازم خانگی در زمان برنامه
- هزینه ۳: هزینه برق مصرفی شارژ خودرو در خارج زمان برنامه
- هزینه ۴: هزینه برق مصرفی شارژ خودرو در زمان برنامه
- هزینه ۵: هزینه برگشت انرژی خودرو به شبکه
- هزینه ۶: هزینه جریمه عدم پیروی از برنامه
- هزینه ۷: پاداش پیروی از برنامه

همانطور که از نتایج مندرج در جدول ۴ مشاهده می‌گردد خودروها ساعت ۱۷ وارد پارکینگ مجتمع مسکونی شده‌اند اما به خاطر قرار گرفتن در ساعت پیک شبکه و اطلاعات و داده‌های آن‌ها اجازه شارژ پیدا نکرده‌اند و نیز چون در بازه‌های قبلی به اندازه کافی شارژ نشده‌اند امکان دشارژ هم ندارند. در ساعت ۲۰ با وجود گذشتن از زمان پیک شبکه هنوز خودرو اجازه شارژ پیدا نکرده است که علت آن این است که سیستم هوشمند با تحلیل داده‌ها پی‌برده است که در زمان‌های ارزان‌تر نیز امکان دریافت انرژی وجود دارد و عملاً تا پایان دوره میان باری اجازه شارژ داده نشده است. با ورود به ساعت ۲۲ که آغاز دوره غیرپیک شبکه است مشاهده می‌شود که در بازه زمانی ۱۲۹-۱۲۸ آن، فرآیند شارژ شروع شده است و سپس قطع شده است. مجدداً از ساعت ۲۳ تا ۴ صبح شارژ انجام و تکمیل شده است. این فرآیند تماماً در بازه غیرپیک شبکه و نیز در کم هزینه‌ترین حالت آن انجام شده است. سپس تا ساعت ۶ صبح اتفاقی رخ نداده و در ساعت ۹-۷ که ساعات پیک شبکه است طبق قرارداد انرژی به شبکه برمی‌گردد و سپس خودرو طبق برنامه از پارکینگ مجتمع مسکونی با شارژی حتی کمی بیش‌تر از نیاز خارج می‌شود.

جهت شبیه‌سازی مدل ارائه شده در بخش ۳، فرض می‌شود در روز دوشنبه از ساعت ۵ بعد از ظهر به مدت ۲ ساعت فرمان EDRP داده می‌شود. مقدار $P_{EDRP,lim}^D$ برای هر خانه ۱ کیلووات در نظر می‌شود. مقدار C_{ben} را حدود ۱۰ برابر نرخ شرایط عادی ۰/۳ دلار بر کیلووات ساعت (توجه شود که این نرخ اغراق‌آمیز نیست زیرا در مواقعی در صورت عدم اجرای برنامه ممکن است قیمت‌های برق تا ۳۰ برابر شرایط عادی افزایش یابد) و مقدار C_{pen} حدود ۱/۵ برابر نرخ شرایط عادی ۰/۴۵ دلار بر کیلووات ساعت در نظر گرفته می‌شود.

میزان و نحوه توزیع بار خانگی مطابق خروجی سیستم مدیریت انرژی که اخیراً توضیح داده شد در نظر گرفته می‌شود. همچنین علاوه بر این بارها مقدار ۰/۱ کیلووات نیز به‌عنوان بار پایه به‌طور پیوسته در شبانه‌روز در نظر گرفته می‌شود. مجموع بارهای این قسمت در ساعت ۵ و ۶ بعد از ظهر این روز ۱/۵۵۵ کیلووات است (۰/۳۵۵ کیلووات ساعت ۵ و ۱/۲ کیلووات ساعت ۶). اطلاعات نحوه شارژ و دشارژ روزانه خودرو برقی نیز در جدول ۴ نشان داده شده است که فرض می‌شود مربوط به روز دوشنبه است.

این اطلاعات نشان می‌دهد در این ساعات خودرو اجازه شارژ ندارد بنابراین مجموع بار خانه همان مقدار ۱/۵۵۵ باقی می‌ماند. در هر حالتی مجموع هزینه برق مصرفی وسایل خانگی در خارج از ساعات برنامه بر اساس قیمت‌های لحظه‌ای محاسبه می‌شود. قیمت بازگشت انرژی به شبکه ۲ برابر قیمت عادی فرض شده است.

۵-۱- سناریو ۱

فرض می‌شود که خودرو در روز یکشنبه نیز با برنامه ذکر شده در قبل شارژ شده باشد. قبلاً اشاره شد که خودرو در مجموع نیاز به ۱۷/۱۶

شبیه‌سازی‌ها و نتایج آن نشان می‌دهد روش پیشنهادی قادر به مدیریت مصرف برق خانگی و برنامه‌ریزی بهینه استفاده از لوازم خانگی با هدف کاهش مصرف و حفظ رفاه بوده است. همچنین زمان‌بندی بهینه شارژ خودروی الکتریکی با کم‌ترین هزینه و بدون تشدید پیک بار شبکه انجام شده است. در قسمت پاسخ‌گویی بار اضطراری نیز مدل معرفی شده قادر به اجرای دستورات بهره‌بردار شبکه با حفظ رفاه مشتری بوده است.

مراجع

- [1] H. Farhangi, "The path of the smart grid," IEEE power and energy magazine, vol. 8, pp. 18-28, 2010.
- [2] United States. Department of Energy, and Spencer Abraham, "National transmission grid study," US Department of Energy, 2002.
- [3] Netbeheer Nederland, "The Road to a Sustainable and Efficient Energy Supply: Smart Grids Roadmap," Version 11 February 2012.
- [4] A. Faruqui, R. Hledik, S. Newell and H. Pfeifenberger, "The power of 5 percent," The Electricity Journal, vol. 20, pp. 68-77, 2007.
- [5] Q. QDR, "Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them," US Dept. Energy, Washington, DC, USA, Tech. Rep, 2006.
- [6] B. Insight, "Smart Metering in Western Europe," M2M research series, 2009.
- [7] Ghassemi, A., S. Bavarian, and L. Lampe. "Cognitive radio for smart grid communications." Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on. IEEE, 2010.
- [8] Federal Energy Regulatory Commission, "Assessment of Demand Response and Advanced Metering", Staff Report, August 2006 (Revised December 2008), <https://www.ferc.gov/legal/staff-reports/demand-response.pdf>.
- [9] M. Pipattanasomporn, M. Kuzlu, and S. Rahman, "An algorithm for intelligent home energy management and demand response analysis," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, pp. 2166-2173, 2012.
- [10] Y. Guo, M. Pan, Y. Fang, and P. P. Khargonekar, "Coordinated energy scheduling for residential households in the smart grid", Smart Grid Communications (SmartGridComm), IEEE Third International Conference on, pp. 121-126, 2012.
- [11] L. P. Qian, Y. J. A. Zhang, J. Huang, and Y. Wu, "Demand response management via real-time electricity price control in smart grids," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 31, pp. 1268-1280, 2013.
- [12] B. Qela and H. Mouftah, "Peak load curtailment in a smart grid via fuzzy system approach," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, pp. 761-768, 2014.
- [13] B. Liu and Q. Wei, "Home energy control algorithm research based on demand response programs and user comfort", Proc. 2nd Int. Conf. Meas. Inf. Control, Harbin, China, pp. 995-999, 2013.
- [14] M. Tasdighi, H. Ghasemi, and A. Rahimi-Kian, "Residential microgrid scheduling based on smart meters data and temperature dependent thermal load modeling," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, pp. 349-357, 2014.
- [15] F. De Angelis, M. Boaro, D. Fuselli, S. Squartini, F. Piazza, and Q. Wei, "Optimal home energy management under dynamic electrical and thermal constraints," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, pp. 1518-1527, 2013.
- [16] T. Huang and D. Liu, "A self-learning scheme for residential energy system control and management," Neural Computing and Applications, vol. 22, pp. 259-269, 2013.

[۱۷] مهدی تورانی، محمدرضا آقاابراهیمی، حمیدرضا نجفی، «برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در ریزشبکه بر پایه مسافرت

از آن‌جا که اجرای برنامه EDRP از قبل به اطلاع مشتری رسانده می‌شود و حتی بعضاً روز قبل نیز می‌تواند اطلاع داده شود اگر خودرو طوری برنامه‌ریزی کند که روز قبل شارژ‌گیری بیش‌تری نماید می‌تواند از قطع بارهای خود در زمان اجرای برنامه جلوگیری نماید که این قضیه مهم با گنجاندن ضریب β در رابطه ۳۹ پیش‌بینی شده است. این حالت در سناریو ۱ محقق شده است. همچنین همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود در زمان اجرای برنامه EDRP مشتری در سناریوی دوم به دلیل کم‌بود شارژ خودرو نمی‌تواند از برنامه پیروی کند و باید جریمه پرداخت کند و نیز از پاداش قابل توجه برنامه هم محروم خواهد شد و اگر قصد تبعیت از برنامه را داشته باشد بایستی برق مصرفی خود را کم کند که این امر مثلاً با خاموش کردن کولر محقق می‌شود از طرفی چون روز اجرای برنامه روز گرمی بوده است این امر امکان‌پذیر نیست زیرا رفاه خانوار شدیداً کاهش می‌یابد. از مقایسه سناریو ۱ و ۲ سناریو ۲ می‌توان نتیجه گرفت مقدار ۶۶/۷۷٪ هزینه مشتری کاهش یافته است و نیز پیک بار در ساعات ۵ و ۶ بعدازظهر به ازای هر خانه که در طرح مشارکت دارد مقدار ۱ کیلووات کاهش یافته است که اگر تعداد خانه‌های مشارکت کننده در طرح به اندازه کافی باشد عمل پیک‌سایبی اضطراری بدون از دست دادن رفاه خانوار به‌خوبی انجام می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با هدف کاهش هزینه برق مصرفی خانوار و نیز پیک‌سایبی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق، برنامه مدیریت مصرف برق خانگی با حضور خودروهای الکتریکی ارائه شده است. در گام اول که مرتبط با برنامه مدیریت مصرف می‌باشد با هدف برنامه‌ریزی روزانه استفاده از لوازم خانگی، یک مدل‌سازی ریاضی از مساله انجام شده است که در آن دو ضریب "میزان توصیه استفاده" و "راحتی خانوار" حضور دارند. این دو ضریب با تاثیرگذاری در مدل بهینه‌سازی معرفی شده می‌توانند آسایش منطقی خانوار را تأمین کنند. روش ارائه شده تطبیقی بوده به آن معنا که در آن ضرایبی جهت در نظر گرفتن شرایط مختلف خانه‌های مسکونی در نظر گرفته شده است. جهت حل این مساله از الگوریتم PSO استفاده شده است. در گام دوم با هدف مشارکت خودروهای برقی در مدیریت مصرف، برنامه بار اضطراری با حضور خودروی برقی بررسی و مدل‌سازی شده است. در گام آخر این مقاله مدیریت و برنامه‌ریزی شارژ خودروی برقی انجام شده است. در این قسمت برای سیستم مدیریت شارژ یک کنترل‌کننده سطح دسترسی به شارژ در ساعات پیک در نظر گرفته شده که در آن از شبکه ANFIS استفاده شده است. این کنترل‌کننده قادر است سطح دسترسی به شارژ خودروها را در ساعات پیک با در نظر گرفتن شرایطی تعیین کند. سپس با توجه به مدل ریاضی تعریف شده یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفته شده است که برای حل آن از الگوریتم NSGAI استفاده شده است.

- distribution grid," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, pp. 371-380, 2010.
- [26] K. J. Baker and R. M. Rylatt, "Improving the prediction of UK domestic energy-demand using annual consumption-data," Applied Energy, vol. 85, pp. 475-482, 2008.
- [27] G. K. Tso and K. K. Yau, "Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks," Energy, vol. 32, pp. 1761-1768, 2007.
- [28] N. A. Burney, "Socioeconomic development and electricity consumption A cross-country analysis using the random coefficient method", Energy Economics, vol. 17, pp. 185-195, 1995.
- [29] M. E. Wijaya and T. Tezuka, "Policy-Making for Households Appliances-Related Electricity Consumption in Indonesia-A Multicultural Country", Open Journal of Energy Efficiency, vol.2, pp.53-64, 2013.
- [30] R. J. Cebula, "Recent evidence on determinants of per residential customer electricity consumption in the US: 2001-2005", Journal of Economics and Finance, vol. 36, pp. 925-936, 2012.
- [31] M. M. Sahebi, E. A. Duki, M. Kia, A. Soroudi, and M. Ehsan, "Simultaneous emergency demand response programming and unit commitment programming in comparison with interruptible load contracts," IET generation, transmission & distribution, vol. 6, pp. 605-611, 2012.
- [32] S. Rajakaruna, F. Shahnia, and A. Ghosh, Plug in electric vehicles in smart grids: Springer, 2015.
- [33] Colli, Demetra V., Joy Sharp, and Lee Giesbrecht. "The 2001 national household travel survey: A look into the travel patterns of older Americans." Journal of safety research 34, no. 4, pp. 461-470, 2003.
- [34] J. González, R. Alvaro, C. Gamallo, M. Fuentes, J. Fraile-Ardanuy, L. Knapen, and D. Janssens, "Determining electric vehicle charging point locations considering drivers' daily activities," Procedia Computer Science ,vol. 32, pp. 647-654, 2014.
- روزانه خودروها»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۶۵-۷۶، زمستان ۱۳۹۵.
- [۱۸] جمشید آقایی، سیداحسان باقری، سجاد شفیع، طاهر نیکنام، سیدمحسن باقری، «بررسی پاسخ‌گویی شبکه توزیع هوشمند به عملکرد خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۱، صفحه ۱۱-۲۰، بهار ۱۳۹۶.
- [19] K. C. Sou, J. Weimer, H. Sandberg, and K. H. Johansson, "Scheduling smart home appliances using mixed integer linear programming", 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, pp. 5144-5149, 2011.
- [20] S. Nistor, J. Wu, M. Sooriyabandara, and J. Ekanayake, "Cost optimization of smart appliances", Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on, pp. 1-5, 2011.
- [21] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, and F. Aminifar, "Load commitment in a smart home," Applied Energy, vol. 96, pp. 45-54, 2012.
- [22] J. M. Lujano-Rojas, C. Monteiro, R. Dufo-Lopez, and J. L. Bernal-Agustín, "Optimum residential load management strategy for real time pricing (RTP) demand response programs," Energy Policy, vol. 45, pp. 671-679, 2012.
- [23] A.-H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, "Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments," IEEE transactions on Smart Grid, vol. 1, pp. 120-133, 2010.
- [24] S. Gottwalt, W. Ketter, C. Block, J. Collins, and C. Weinhardt, "Demand side management—A simulation of household behavior under variable prices," Energy Policy, vol. 39, pp. 8163-8174, 2011.
- [25] K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential