

برنامه‌ریزی احتمالی انرژی در ریزشبه شامل خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر

ابوالفضل قاسمی^۱، مهدی بانژاد^۲، دانشیار، مرتضی رحیمی‌ان^۳، دانشیار

۱- دانشکده برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران
a.ghasemi@shahroodut.ac.ir

۲- دانشکده برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران
m.banejad@shahroodut.ac.ir

۳- دانشکده برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران
morteza.rahimiyan@shahroodut.ac.ir

چکیده: با گسترش مفهوم ریزشبه و هوشمندسازی شبکه‌های الکتریکی، امروزه منابع تولید پراکنده و ذخیره‌کننده‌ها با سرعت بیشتری به سیستم قدرت اضافه می‌شوند. همچنین به دلیل جدی‌تر شدن بحث آلودگی هوا، تعداد خودروهای الکتریکی در بخش حمل و نقل رو به افزایش می‌باشد که این موضوع موجب اضافه شدن بار الکتریکی شبکه می‌گردد. با وجود زیرساخت‌های لازم و مدیریت صحیح، خودروهای الکتریکی مدرن می‌توانند برخی اوقات به عنوان یک منبع انرژی به تامین بارهای شبکه نیز کمک کنند. این مقاله با توجه به قیمت بازار انرژی، قیمت پیشنهادی توسط منابع تولید پراکنده و همچنین خودروهای الکتریکی موجود در ریزشبه، مدیریت انرژی روز آینده را برای منابع تولید و ذخیره مورد مطالعه قرار داده است. به دلیل حضور منابع تجدیدپذیر و وجود عدم قطعیت در تولید، برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای پیشنهاد شده است. ساختار مساله به صورت برنامه‌ریزی احتمالی خطی مختلط با عدد صحیح می‌باشد که برای یک سیستم نمونه توسط نرم افزار GAMS شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند که به کمک این برنامه‌ریزی، مدیریت ریزشبه قادر خواهد بود تا قبل از مشخص شدن مقدار دقیق تولید منابع تجدیدپذیر برخی تصمیمات را به صورت قطعی اتخاذ نماید؛ به طوری که مجموع هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار حداقل گردد.

واژه‌های کلیدی: ریزشبه، مدیریت انرژی، منابع تجدیدپذیر، خودروهای الکتریکی، برنامه‌ریزی احتمالی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۶/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۹/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول : مهدی بانژاد

نشانی نویسنده‌ی مسئول : شاهرود- پردیس دانشگاه صنعتی شاهرود- دانشکده برق و رباتیک

۱- مقدمه

مسالهی انرژی یکی از عوامل بسیار مهم در توسعه‌ی جوامع به شمار می‌رود و تامین انرژی پایدار از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی کشورهای مختلف می‌باشد [1]. استفاده از سیستم‌های تولید پراکنده و منابع تجدیدپذیر به عنوان یکی از راهکارهای پاسخگویی به این چالش معرفی شده است؛ به طوری که امروزه این قبیل تکنولوژی‌ها در حال اضافه شدن به شبکه‌های توزیع می‌باشند. در همین راستا مفهوم ریزشبکه‌ها برای مدیریت تکنولوژی‌های جدید پیشنهاد شده‌اند [2]. ریزشبکه‌ها سیستم‌های قدرت کوچک و مدرن هستند که وجود منابع مختلف تولید و ذخیره‌ساز در آن‌ها، فوایدی همچون کاهش هزینه‌ها، بهبود قابلیت اطمینان و کاهش انتشار گازهای آلاینده را می‌تواند به همراه داشته باشد [3,4].

پس از مقررات زدایی از صنعت برق، هوشمندسازی شبکه یکی از جدیدترین پیشنهاداتی بوده که در سیستم قدرت مطرح شده است. شبکه‌های هوشمند برای انتقال و توزیع بهینه‌ی برق از سوی تامین‌کنندگان به مصرف‌کنندگان، از تکنولوژی ارتباطات و اطلاعات استفاده می‌کنند [5]. ریزشبکه‌های هوشمند یک راه مناسب برای اضافه کردن منابع تجدیدپذیر در سطح عمومی می‌باشند و مشارکت مشترکان را در پروژه‌های عمومی سیستم قدرت ممکن می‌سازند [6].

با جدی‌تر شدن موضوع آلودگی هوا، بسیاری از کشورها سیاست کاهش انتشار گازهای آلاینده را در پیش گرفته‌اند [7]. این موضوع موجب شده است تا تکنولوژی‌های تولید پراکنده و منابع تجدیدپذیر بسیار مورد توجه قرار بگیرند تا جایی که برای استفاده از این سیستم‌ها، مشوق‌های مالی در نظر گرفته می‌شود [8]. با توجه به سهم بالای بخش حمل و نقل در تولید آلاینده‌ها، پیش‌بینی می‌شود که خودروهای الکتریکی مدرن با قابلیت شارش توان به سمت شبکه ($V2G$) در آینده‌ای نزدیک از اجزای مهم شبکه‌های الکتریکی و حمل و نقل به شمار بروند [9]. شارژ بدون کنترل این خودروها ممکن است مشکلاتی را در پی داشته باشد؛ در حالی که اگر این کار به صورت برنامه‌ریزی شده انجام شود، می‌تواند به حل برخی از مشکلات شبکه کمک کند [10]. این عوامل باعث شده‌اند تا مدیریت شارژ / دشارژ خودروهای الکتریکی در مراجع مختلفی مورد مطالعه قرار بگیرد. به عنوان نمونه در [11] استراتژی‌های مختلف شارژ خودروهای الکتریکی شامل شارژ بدون کنترل و کنترل هوشمند با قابلیت $V2G$ ، مورد بررسی قرار گرفته است. در [12] معادلات مربوط به دینامیک‌های مکانیکی خودرو و همچنین تلفات باتری نیز در شارژ بهینه‌ی خودروها لحاظ شده‌اند. مرجع [13] با استفاده از یک مدل استاتیکی برای بارهای مربوط به شارژ خودروها، شیوه‌ای برای مدیریت انرژی مصرفی خودروهای الکتریکی ارائه نموده است. در [14]، استراتژی‌های بهینه‌ی استفاده از خودروهای الکتریکی و ایستگاههای تعویض باتری خودرو در یک ریزشبکه‌ی هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است. برای ایجاد هماهنگی میان شارژ خودروها و ایستگاههای تعویض باتری، از

مدل مبتنی بر قیمت استفاده شده که هدف آن حداقل‌سازی هزینه‌ی شارژ خودروها و حداکثرسازی سود ایستگاه‌ها بوده است.

یکی از مسایل مهمی که همواره در سیستم‌های انرژی مورد توجه بوده است، بحث مدیریت انرژی می‌باشد. طبق تعریف انجمن مهندسان آلمان، مدیریت انرژی شامل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری واحدهای تولید و مصرف انرژی است؛ به طوری که نیازها تامین گردند و اهداف زیست محیطی و اقتصادی برآورده شوند [15]. در طی سالیان اخیر مطالعات زیادی بر روی مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها انجام شده است و مراجع مختلفی مانند [16-19] مدیریت تولید و بار را در ریزشبکه‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. بسیاری از این مطالعات یک مدل را برای برنامه‌ریزی انرژی ارائه داده و به شیوه‌های مختلف آن را حل نموده و مورد تحلیل قرار داده‌اند. به عنوان نمونه [17] به کمک برنامه‌ریزی خطی مختلط با عدد صحیح مدلی را برای مدیریت تولید، بار و ذخیره‌سازی پیشنهاد داده است. در مسایل برنامه‌ریزی انرژی، معیارهای مختلفی به عنوان تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مراجع بسیاری از جمله [17,20]، حداقل‌سازی هزینه‌ی انرژی را به عنوان تابع هدف در نظر گرفته‌اند. هر چند معیارهایی مانند حداقل‌سازی آلاینده‌ی [21]، حداقل نمودن مصرف سوخت خودروهای هیبریدی [22]، حداقل‌سازی تلفات سیستم [23] و همچنین حداکثرسازی رفاه اجتماعی [24] نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند.

مرجع [25] به برنامه‌ریزی انرژی روز آینده در ریزشبکه‌ی هوشمند پرداخته است که در آن برخی از مصرف‌کنندگان دارای منابع تولید پراکنده و ذخیره‌کننده بوده و قادر به شرکت در برنامه‌ی مدیریت مصرف با هدف کاهش هزینه‌ها می‌باشند. در [26] یک مدل خطی مختلط با عدد صحیح برای استفاده از واحدهای تولید پراکنده ارائه شده و تاثیر خودروی الکتریکی به عنوان بار پاسخگو بر روی هزینه‌ی تولید، مورد مطالعه قرار گرفته است. در [27] نیز از طریق برنامه‌ریزی وسایل مصرفی مشترکان خانگی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ی انرژی، مدیریت بار در شبکه‌ی هوشمند با تعرفه‌ی انرژی غیرثابت مورد مطالعه قرار گرفته است. در همین راستا، [28] نیز یک روش بهینه را برای ورود و خروج بارهای مشترکان خانگی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های انرژی ارائه نموده است.

پیش‌بینی نمودن برخی پارامترها در آینده، مانند تولید منابع تجدیدپذیر و بار، همواره با خطا همراه می‌باشد که این موضوع می‌تواند برنامه‌ریزی انرژی را با چالش روبرو کند [3]. مطالعات مختلف از روش‌های متعددی برای تحلیل عدم قطعیت استفاده کرده‌اند. به عنوان نمونه در [19] یک شیوه احتمالی برای مدیریت انرژی در ریزشبکه ارائه شده که در آن تولید منابع تجدیدپذیر نیز لحاظ گشته است. مسالهی نوع برنامه‌ریزی خطی مختلط با عدد صحیح بوده که به کمک تجزیه بندرز حل شده است. مرجع [23] با لحاظ نمودن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی تولید و ذخیره را انجام داده و از تابع چند هدفه که دارای دو بخش تلفات و رزرو می‌باشد، استفاده نموده

۲- مدیریت انرژی در ریزشبه

با بکارگیری منابع مختلف تولید و همچنین بارهای پاسخگو در ریزشبه‌ها، به طور یقین مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی در شبکه‌های هوشمند آینده همچنان از محورهای مهم مطالعات سیستم‌های قدرت خواهد بود. از آنجا که خودروهای الکتریکی یکی از گروه‌های مصرفی در شبکه‌های آینده به شمار می‌آید، برنامه‌ریزی بهینه‌ی شارژ/دشارژ خودروها در مدیریت انرژی بسیار مهم خواهد بود. در مدیریت انرژی ریزشبه، عملکرد بهینه‌ی هر یک از اجزای سیستم مانند منابع تولید پراکنده و ذخیره‌کننده‌ها در دوره‌ی بهره‌برداری تعیین می‌گردد. در این مطالعه، تبادل انرژی با شبکه‌ی بالادستی، تولید توسط منابع محلی و همچنین شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی در طول دوره برنامه‌ریزی به گونه‌ای انجام می‌شود تا مجموع هزینه‌های بهره‌برداری حداقل شود. بدین منظور نیاز است تا روابط حاکم بر سیستم به خوبی مشخص شوند.

بهره‌بردار ریزشبه موظف به تامین کل بار مصرفی ریزشبه، متشکل از بارهای عادی و خودروهای الکتریکی، می‌باشد. مجموع هزینه‌های خرید انرژی از شبکه، خرید انرژی از مولدهای محلی و خودروها، و هزینه‌ی وارد مدار کردن واحدهای محلی، به عنوان هزینه‌ی کل بهره‌برداری در نظر گرفته شده است. با فرض این که هیچ عدم قطعیتی در مساله وجود نداشته باشد، رابطه‌ی (۱) ساختار هزینه‌ی کل را در دوره‌ی بهره‌برداری نشان می‌دهد:

$$\text{Min } F = \sum_t (C_t^{\text{grid}} + C_t^{\text{DG}} + C_t^{\text{SU}} + C_t^{\text{EV}}) \quad (1)$$

که $C_t^{\text{grid}}, C_t^{\text{DG}}, C_t^{\text{SU}}, C_t^{\text{EV}}$ به ترتیب هزینه‌های تبادل انرژی با شبکه، انرژی خریداری شده از منابع تولید پراکنده، راه‌اندازی منابع تولید پراکنده و انرژی خریداری شده از خودروهای الکتریکی در بازه زمانی t ام می‌باشند. با توجه به این که مساله‌ی مدیریت انرژی در این مقاله به صورت احتمالی مورد بررسی قرار گرفته است، در بخش‌های بعدی تابع هدف به شکل کامل‌تری بازنویسی خواهد شد.

۲-۱- تشریح تابع هدف و قیود حاکم بر مساله

- تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی

در حالت کلی ریزشبه می‌تواند به شبکه‌ی اصلی متصل باشد یا این که به صورت مستقل کار کند. در صورت متصل بودن به شبکه‌ی بالادست، ریزشبه علاوه بر دریافت انرژی، می‌تواند تولید مازاد خود را نیز به شبکه تحویل دهد. مقدار توان تبدالی با شبکه‌ی اصلی (P_t^{grid}) دارای محدودیت می‌باشد:

$$P_{\min}^{\text{grid}} \leq P_t^{\text{grid}} \leq P_{\max}^{\text{grid}} \quad (2)$$

است. همچنین در [29] نیز یک برنامه‌ریزی احتمالی انرژی در ریزشبه پیشنهاد شده است که تکنولوژی‌های مختلف تولید پراکنده، منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها در نظر گرفته شده و مساله برنامه‌ریزی پیشنهادی به کمک روش‌های هوشمند حل شده است. در [30] نیز به مساله‌ی وارد کردن واحدهای تولیدی به مدار با لحاظ کردن عدم قطعیت تولید و بار مصرفی پرداخته شده است. این مرجع تعدادی سناریوی معتبر برای عدم قطعیت منابع باد و خورشید و بار لحاظ نموده و تحت سناریوهای مختلف، یک الگوریتم برای حداقل‌سازی هزینه و آلاینده‌ی ارایه داده است. مرجع [31] مدیریت منابع انرژی در ریزشبه را انجام داده است که در آن عدم قطعیت انرژی‌های تجدیدپذیر، رزرو مورد نیاز و بار خودروهای الکتریکی در نظر گرفته شده‌اند. در [32] مفهوم پارکینگ هوشمند برای خودروهای الکتریکی مطرح شده و مدلی برای مدیریت منابع انرژی در یک ریزشبه که دارای پارکینگ‌های هوشمند می‌باشد، پیشنهاد شده است. برخی از مطالعات مانند [16] نیز در برنامه‌ریزی‌ها از مفهوم تجمیع‌کننده یا اگرگیتور^۲ به عنوان یک عامل واسطه میان مصرف‌کنندگان و بهره‌بردار شبکه استفاده نموده‌اند.

مقاله‌ی حاضر به مطالعه‌ی مدیریت انرژی در ریزشبه می‌پردازد که دارای منابع تولید پراکنده، بار مصرفی و همچنین خودروهای الکتریکی با قابلیت V2G می‌باشد. این ریزشبه به شبکه‌ی اصلی متصل بوده و در آن علاوه بر مولدهای سوخت فسیلی، پنل‌های فتوولتاییک نیز بخشی از تولید را بر عهده دارند. بنابراین عدم قطعیت موجود در تولید باید در برنامه‌ریزی انرژی لحاظ شود که بدین منظور از برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای^۳ استفاده شده است. به طور کلی محورهای مهم این مقاله عبارتند از:

- پیشنهاد مدیریت انرژی در ریزشبه دارای منابع تجدیدپذیر (فتوولتاییک) و خودروهای الکتریکی به صورت برنامه‌ریزی خطی مختلط با عدد صحیح.
- در نظر گرفتن مساله‌ی ورود و خروج واحدهای تولیدی (UC^4)
- لحاظ نمودن عدم قطعیت تولید و توسعه‌ی برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای.

در این مطالعه فرض شده است که سیستم مدیریت انرژی ریزشبه به قیمت‌های بازار روز آینده دسترسی دارد [31,32]. با توجه به ساختار مساله، برنامه‌ریزی انرژی به صورت یک برنامه‌ریزی احتمالی خطی مختلط با عدد صحیح پیشنهاد شده است و نتایج شبیه‌سازی برای یک سیستم نمونه به کمک نرم افزار GAMS^۵ مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

$$C_t^{SU} = \sum_j SUC_{j,t} \quad (الف.۱۰)$$

$$SUC_{j,t} = \begin{cases} SU_j & \text{if } (w_{j,t} - w_{j,t-1}) > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (ب.۱۰)$$

که هزینه $SUC_{j,t}$ بابت راهاندازی شدن واحد j در زمان t می‌باشد. متغیر باینری $w_{j,t}$ در مدار بودن ($=1$) و خارج از مدار بودن ($=0$) واحد j در زمان t را بیان می‌کند. SU_j نیز مقدار هزینه‌ای است که بابت هر بار راهاندازی مولد j ، به سیستم تحمیل می‌گردد.

همچنین منابع موجود در ریزشبهه دارای محدودیت تولید می‌باشند. اگر واحد j در مدار باشد ($w_{j,t} = 1$) آنگاه $P_{j,min}^{DG}, P_{j,max}^{DG}$ به ترتیب حداکثر و حداقل توان تولیدی آن واحد می‌باشند.

$$w_{j,t} \cdot P_{j,min}^{DG} \leq P_{j,t}^{DG} \leq w_{j,t} \cdot P_{j,max}^{DG} \quad (۱۱)$$

منابع تولید پراکنده می‌توانند مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و یا انرژی‌های تجدیدپذیر باشند. مهم‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد و خورشید هستند. در این مقاله از تکنولوژی فتوولتایک استفاده شده است که میزان تولید توسط این سیستم‌ها، به تابش خورشید وابسته است. برنامه‌ریزی انرژی برای روز آینده مستلزم پیش‌بینی میزان تابش خورشید می‌باشد و از طریق آن می‌توان توان تولیدی سیستم فتوولتایک را تخمین زد.

در صورتی که مقدار تابش خورشید در هر لحظه مشخص باشد، با صرف‌نظر از تأثیرات دمای محیط، به کمک (۱۲) می‌توان حداکثر توان قابل استخراج از پنل فتوولتایک را محاسبه نمود [31].

$$P_t^{PV} = \eta_{pv} \times A_{pv} \times si_t \quad (۱۲)$$

P_t^{PV} توان خروجی فتوولتایک (کیلووات) برای تابش si_t (کیلووات بر متر مربع) در دوره زمانی t بوده و همچنین η_{pv} و A_{pv} به ترتیب راندمان و سطح پنل فتوولتایک (مترمربع) می‌باشند.

- خودروی الکتریکی

خودروهای الکتریکی می‌توانند در برخی زمان‌ها با دشارژ باتری، مقداری از انرژی ذخیره شده‌ی خود را به ریزشبهه تحویل دهند. با توجه به پیشنهاد قیمت از طرف مالکان خودروها، هزینه‌ی خرید انرژی از خودروهای الکتریکی به صورت (۱۳) بیان می‌شود:

$$C_t^{EV} = \sum_i \pi_{i,t}^{EV} \cdot P_{i,t}^{gen} \cdot \Delta t \quad (۱۳)$$

که $P_{i,t}^{gen}$ و $\pi_{i,t}^{EV}$ به ترتیب توان تحویلی و قیمت پیشنهادی خودروی i در بازه زمانی t ام می‌باشند. مقدار انرژی ذخیره شده در باتری خودرو ($E_{i,t}$) در زمان اتصال به شبکه طبق (۱۴-الف) قابل محاسبه است [32]. همچنین در زمان جدا بودن از شبکه نیز می‌توان از (۱۴-ب) استفاده نمود.

$$E_{i,t} - E_{i,t-1} = [\eta_i^{ch} \times P_{i,t}^{ch} - \frac{1}{\eta_i^{dch}} P_{i,t}^{gen}] \Delta t \quad (الف-۱۴)$$

که $P_{min}^{grid}, P_{max}^{grid}$ به ترتیب حداکثر و حداقل توان تبدیلی می‌باشند. همچنین با توجه به شارش توان یکطرفه یا دوطرفه، حد پایین توان تبدیلی طبق (۳) بیان می‌گردد.

$$P_{min}^{grid} = \begin{cases} 0 & \text{تبادل توان یکطرفه} \\ -P_{max}^{grid} & \text{تبادل توان دوطرفه} \end{cases} \quad (۳)$$

با در نظر گرفتن گام زمانی Δt ساعت، هزینه‌ی تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی را می‌توان به صورت (۴) نوشت:

$$C_{grid}^t = \left[\alpha_t \cdot \pi_{b,t}^{grid} + (1 - \alpha_t) \cdot \pi_{s,t}^{grid} \right] \cdot P_t^{grid} \cdot \Delta t \quad (۴)$$

که $\pi_{b,t}^{grid}$ و $\pi_{s,t}^{grid}$ به ترتیب قیمت خرید و فروش برق از (به) شبکه و P_t^{grid} توان خالص دریافتی از شبکه‌ی اصلی در زمان t می‌باشد. با توجه به این که در حالت کلی قیمت خرید و فروش انرژی می‌تواند متفاوت باشد و ریزشبهه در هر لحظه یا از شبکه انرژی دریافت می‌کند یا به آن تزریق می‌نماید، از متغیر باینری α_t کمک گرفته شده است.

$$\alpha_t = \begin{cases} 1 & \text{if } P_t^{grid} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۵)$$

به واسطه‌ی وجود متغیر α در (۴)، تابع هدف (۱) غیر خطی خواهد بود. برای اجتناب از غیر خطی شدن تابع هدف، توان تبدیلی خالص با شبکه طبق (۶) بصورت دو متغیر مثبت در نظر گرفته شده است.

$$P_t^{grid} = P_{b,t}^{grid} - P_{s,t}^{grid} \quad (۶)$$

$P_{s,t}^{grid}, P_{b,t}^{grid}$ به ترتیب توان خریداری شده و فروخته شده به شبکه هستند که در هر لحظه حداکثر یکی از این دو متغیر مقدار غیر صفر دارند. همچنین مقدار توان تبدیلی با شبکه‌ی اصلی نمی‌تواند از مقدار حداکثر P_{max}^{grid} تجاوز نماید. بنابراین می‌توان آن‌ها را به صورت (الف.۷) تا (ج.۷) مدل نمود.

$$P_{b,t}^{grid} \leq \alpha_t P_{max}^{grid} \quad (الف.۷)$$

$$P_{s,t}^{grid} \leq (1 - \alpha_t) P_{max}^{grid} \quad (ب.۷)$$

$$P_{b,t}^{grid}, P_{s,t}^{grid} \geq 0 \quad (ج.۷)$$

حال می‌توان (۴) را به صورت (۸) بازنویسی نمود.

$$C_{grid}^t = \left[P_{b,t}^{grid} \cdot \pi_{b,t}^{grid} - P_{s,t}^{grid} \cdot \pi_{s,t}^{grid} \right] \cdot \Delta t \quad (۸)$$

- منابع تولید پراکنده

با توجه به توان تولیدی مولد j ام و قیمت پیشنهادی آن در بازه‌ی زمانی t ام که به ترتیب با $P_{j,t}^{DG}$ و $\pi_{j,t}^{DG}$ نشان داده می‌شوند، هزینه‌ی خرید انرژی از منابع تولید پراکنده مطابق با (۹) خواهد بود.

$$C_t^{DG} = \sum_j \pi_{j,t}^{DG} P_{j,t}^{DG} \cdot \Delta t \quad (۹)$$

هزینه‌ی راهاندازی واحدها نیز می‌تواند طبق (۱۰) مدل شود:

با در نظر گرفتن قید رزرو (۲۰)، علاوه بر (۱۱) باید محدودیت (۲۳) نیز اعمال شود که $R_{j,t}^{DG}$ مقدار رزرو مولد j ام در زمان t می‌باشد.

$$P_{j,t}^{DG} + R_{j,t}^{DG} \leq w_{j,t} \cdot P_{j,\max}^{DG} \quad (23)$$

۳- برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای

عواملی مانند استفاده از منابع تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی انرژی در ریزشبه را با چالش عدم قطعیت همراه می‌کنند. با وجود این که روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی این موارد وجود دارند، اما به طور نمونه هیچ تضمینی وجود ندارد که مقدار پیش‌بینی شده‌ی تولید منابع تجدیدپذیر با توان تولیدی آن‌ها در زمان واقعی دقیقاً برابر باشد. بنابراین همواره خطای پیش‌بینی وجود خواهد داشت. با توجه به این که پارامترهای عدم قطعیت در سیستم وجود دارند؛ در این مطالعه از روش برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای برای مدیریت انرژی ریزشبه استفاده شده است. همانگونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای برخی از تصمیمات در مرحله اول اتخاذ می‌شوند؛ یعنی قبل از اینکه اطلاعات پیش‌بینی شده به طور قطعی مشخص شوند. تصمیم‌گیری مرحله دوم نیز تا زمانی که اتفاقات آینده مشاهده نشوند، به تعویق می‌افتد. بنابراین استفاده از برنامه‌ریزی دومرحله‌ای این امکان را بوجود می‌آورد تا بهره‌بردار ریزشبه بتواند قبل از تحقق عدم قطعیت‌ها (در روز آینده) یک سری تصمیمات را اتخاذ نماید؛ به طوری که با معلوم شدن سناریوی رخ داده در آینده، این تصمیمات تغییری نخواهند کرد. اما با توجه به مشاهده‌ی داده‌های واقعی در روز آینده، متغیرهای مرحله دوم می‌توانند بگونه‌ای تعیین شوند تا حداقل هزینه حاصل گردد.

به عنوان نمونه در مساله‌ی مورد مطالعه، بهره‌بردار ریزشبه در مرحله اول برای میزان خرید انرژی از بازار روز آینده بطور قطعی تصمیم می‌گیرد؛ در حالی که میزان دقیق تولید فتولتائیک در روز آینده مشخص خواهد شد. به منظور تصمیم‌گیری در محیط غیرقطعی معمولاً از یک توزیع احتمال استفاده می‌شود که خطای پیش‌بینی را نشان می‌دهد. از جایی که در نظر گرفتن تمام حالات پیوسته‌ی توزیع احتمال کاری شاید پردردسر و غیر ضروری باشد، چندین حالت گسسته (که به عنوان سناریو شناخته می‌شود) می‌تواند از روی آن استخراج گردد و در برنامه‌ریزی مورد استفاده قرار بگیرد [30].

فرم کلی مساله‌ی برنامه‌ریزی احتمالی خطی دو مرحله‌ای به صورت (۲۴) می‌باشد [33]:

$$\min_x \{c^T x + E_\omega [Q(x, \omega)]\} \quad (24)$$

$$s.t. \quad Ax \geq b, \quad x \geq 0$$

که E عملگر امید ریاضی و ω بیانگر سناریو می‌باشد. $x \in R^n$ بردار متغیرهای تصمیم‌گیری مرحله اول و c بردار ضرایب متغیرهای مرحله اول در تابع هدف می‌باشد. همچنین A و b به ترتیب ماتریس و

$$E_{i,t} - E_{i,t-1} = -d_t \times E_{i,t}^{trip} \quad (14-b)$$

در این رابطه؛ $P_{i,t}^{ch}$ توان شارژ خودرو، $\eta_i^{dch}, \eta_i^{ch}$ به ترتیب راندمان شارژ و راندمان دشارژ باتری خودرو، $E_{i,t}^{trip}$ انرژی مصرفی خودرو در هر کیلومتر هنگام حرکت و d_t میزان حرکت خودرو بر حسب کیلومتر در بازه زمانی t می‌باشد.

مقدار انرژی ذخیره شده در باتری خودروها دارای محدودیت می‌باشد:

$$E_{i,\min} \leq E_{i,t} \leq E_{i,\max} \quad (15)$$

که $E_{i,\min}, E_{i,\max}$ به ترتیب حداکثر و حداقل انرژی ذخیره شده مجاز در باتری خودروی i ام می‌باشند.

میزان توان شارژ و دشارژ خودروها نیز دارای محدودیت است و همچنین یک خودرو نمی‌تواند به طور همزمان در یک لحظه شارژ و دشارژ شود. بدین منظور از متغیرهای باینری r, s استفاده شده است.

$$0 \leq P_{i,t}^{gen} \leq con_{i,t} \times r_{i,t} \times P_{i,\max} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{ch} \leq con_{i,t} \times s_{i,t} \times P_{i,\max} \quad (17)$$

$$r_{i,t} + s_{i,t} \leq 1, \quad s, r \in \{1, 0\} \quad (18)$$

که $P_{i,\max}$ حداکثر توان شارژ و دشارژ خودروی i ام و $con_{i,t}$ وضعیت اتصال خودروی i ام به شبکه است. هنگامی که $con_{i,k} = 1$ باشد یعنی خودروی i ام در زمان $t = k$ به شبکه متصل است.

- تامین بار و رزرو

با صرف نظر از تلفات سیستم، مجموع توان تولیدی در ریزشبه و توان تبدیلی با شبکه‌ی بالادستی باید با میزان بار مصرفی برابر باشد:

$$D_t + \sum_i P_{i,t}^{ch} - \sum_i P_{i,t}^{gen} - \sum_j P_{j,t}^{DG} - P_t^{grid} = 0 \quad (19)$$

که D_t میزان بار مصرفی در زمان t می‌باشد. بهره‌بردار ریزشبه باید از وجود رزرو کافی اطمینان داشته باشد. با فرض این که میزان رزرو چرخان بایستی توسط منابع موجود در ریزشبه و خودروها تامین گردد، مطابق (۲۰) خواهیم داشت:

$$R_t^{DG} + R_t^{EV} \geq R_{tot,t} \quad (20)$$

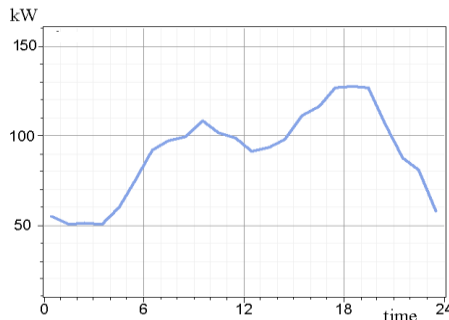
که R_t^{EV}, R_t^{DG} به ترتیب مقدار رزرو چرخان منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی بوده که طبق (۲۱) و (۲۲) محاسبه می‌گردند. $R_{tot,t}$ نیز حداقل رزرو مورد نیاز ریزشبه در زمان t می‌باشد.

$$R_t^{DG} = \sum_j w_{j,t} \cdot P_{j,\max}^{DG} - \sum_j P_{j,t}^{DG} \quad (21)$$

$$R_t^{EV} = \sum_i con_{i,t} \cdot \min \left\{ \left(\frac{E_{i,t} - E_{i,\min}}{\Delta t} \right), P_{i,\max} \right\} \quad (22)$$

سوختی^۱ (FC1, FC2) و فتوولتاییک (PV^۲) می‌باشند. مشخصات فنی مولدها نیز در جدول (۱) نشان داده شده است [17].

در این ریزشبه فرض شده است که ۲۰۰ متر مربع پنل فتوولتاییک با راندمان ۱۵٪ نصب شده و همچنین ۲۰ خودروی الکتریکی در آن ناحیه وجود دارند که مشخصات خودروها از لحاظ فنی یکسان در نظر گرفته شده است. برخی از مشخصات این خودروها در جدول (۲) آورده شده که مشابه مشخصات خودروی Volkswagen E-Golf می‌باشد [34]. به دلایل فنی اجازه داده نمی‌شود تا سطح انرژی ذخیره شده در باتری از ۹۵٪ بیشتر و از ۲۰٪ کمتر گردد [35].



شکل (۲): الگوی بار مصرفی ریزشبه

جدول (۱): مشخصات مولدهای ریزشبه

مولد	$P_{\max}(kW)$	$P_{\min}(kW)$	$SU(\$)$
میکروتوربین (MT)	30	6	0.14
پیل سوختی ۱ (FC1)	20	2	0.24
پیل سوختی ۲ (FC2)	20	2	0.18

جدول (۲): مشخصات خودروهای الکتریکی

تعداد خودرو	20
راندمان شارژ و دشارژ	0.93
ظرفیت باتری	24 kWh
حداقل سطح انرژی	3.6 kWh
حداکثر توان شارژ/دشارژ	7.2 kW
میانگین مصرف انرژی	0.13 kWh/km
میانگین مسافت طی شده	30 km/day

این امکان وجود دارد تا بهره‌بردار ریزشبه، برق را با قیمت بازار انرژی از شبکه‌ی اصلی خریداری نماید یا مازاد تولید را به آن بفروشد. با لحاظ نمودن گام برنامه‌ریزی ۱ ساعته ($\Delta t = 1h$)، قیمت بازار انرژی برای خرید هر کیلووات ساعت برق از شبکه‌ی اصلی و همچنین قیمت فروش پیشنهادی مولدها برای یک دوره زمانی ۲۴ ساعته در جدول (۳) آورده شده است. برای خودروها نیز قیمت فروش 0.1 \$/kWh لحاظ شده است.

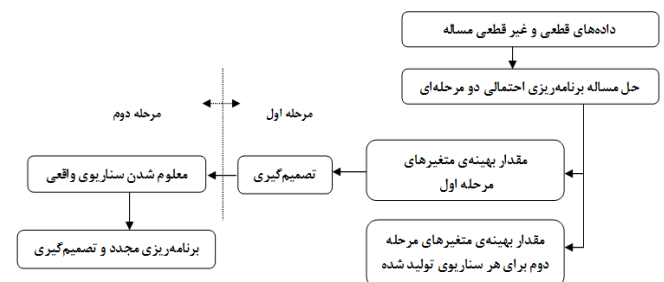
در این مطالعه فرض شده است که مشترکان از زیرساخت‌های لازم برای شارژ خودروها برخوردار بوده و هنگامی که خودروها در پارکینگ هستند به شبکه متصل می‌باشند. با در نظر گرفتن احتمال متوقف بودن خودروها در پارکینگ منازل در ساعات مختلف مطابق جدول

بردار ضرایب بوده و مربوط به قیودی هستند که فقط متغیرهای مرحله اول را شامل می‌شوند. $Q(x, \omega)$ نیز مقدار بهینه‌ی زیرمساله‌ی مرحله دوم می‌باشد که به صورت (۲۵) تعریف می‌گردد.

$$Q(x, \omega) = \min_y q_{\omega}^T y \quad (25)$$

$$s.t. \quad T_{\omega}x + W_{\omega}y \geq h_{\omega}, \quad y \geq 0$$

$y \in R^m$ بردار متغیرهای تصمیم‌گیری مرحله دوم، q بردار ضرایب تابع هدف مرحله دوم و همچنین T_{ω} ، W_{ω} و h_{ω} ماتریس‌ها و بردار ضرایب مربوط به قیودی می‌باشند که در آن‌ها متغیرهای مرحله دوم وجود دارند.



شکل (۱): مفهوم برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای

در این مقاله به کمک نمونه‌برداری، تعداد محدودی سناریو برای تابش خورشید در روز آینده در نظر گرفته شده است. انرژی تبادل با شبکه‌ی اصلی، شارژ/دشارژ خودروها و همچنین در مدار قرار گرفتن منابع تولید پراکنده در کل ساعات دوره برنامه‌ریزی به عنوان متغیرهای مرحله اول، و میزان تولید منابع موجود در ریزشبه به عنوان متغیرهای مرحله دوم در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین تمامی قیودی که در بخش‌های قبلی بیان شدند و در آن‌ها متغیرهای مرحله دوم، یعنی P_j^{DG} وجود دارد، قیود زیرمساله هستند. همچنین جمله‌ی C_t^{DG} در رابطه‌ی (۱) وابسته به سناریویی خواهد بود که رخ می‌دهد. تحت این شرایط و با توجه به (۹)، تابع هدف مربوط به مرحله دوم که مقدار بهینه‌ی آن در زیرمساله تعیین می‌شود را می‌توان به صورت (۲۶) نوشت:

$$C_{t,\omega}^{DG} = \sum_j \pi_{j,t}^{DG} P_{j,t,\omega}^{DG} \times \Delta t \quad (26)$$

۴- شبیه‌سازی

۴-۱- سیستم مورد مطالعه

در این بخش، مدل پیشنهادی مدیریت انرژی بر روی یک سیستم نمونه واقع در ناحیه‌ی مسکونی مورد بررسی قرار می‌گیرد. الگوی بار مصرفی ریزشبه‌ی مورد مطالعه مطابق با شکل (۲) می‌باشد. منابع تولید پراکنده موجود در این ریزشبه میکروتوربین (MT^۱)، دو پیل

(۴)، تعداد خودروهای متصل به شبکه در ساعات شبانه‌روز به کمک مکانیزم چرخ رولت [35] تخمین زده شده است.

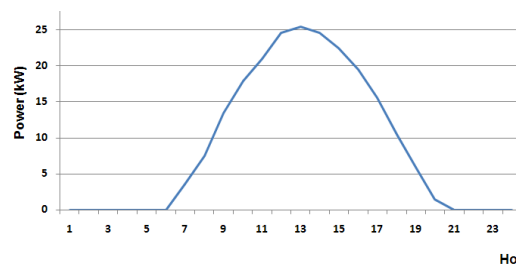
با توجه به عدم قطعیت موجود در سطح انرژی باتری خودروها هنگامی که برای اولین بار به شبکه متصل می‌شوند، مقدار شارژ اولیه خودروها می‌تواند توسط توزیع احتمالی محاسبه گردد. به این منظور از توزیع یکنواخت در بازه $(E_{\min}, 0.5E_{\max})$ برای تخمین سطح اولیه شارژ خودروها هنگام متصل شدن به شبکه استفاده شده است [31].

جدول (۳): قیمت پیشنهادی منابع تولید و بازار انرژی (\$/kWh) [17]

ساعت	FC1	FC2	MT	PV	بازار انرژی
1	0.166	0.175	0.107	-	0.033
2	0.166	0.176	0.107	-	0.027
3	0.167	0.176	0.108	-	0.020
4	0.1677	0.177	0.108	-	0.017
5	0.167	0.178	0.109	-	0.017
6	0.168	0.179	0.109	-	0.029
7	0.168	0.18	0.11	-	0.033
8	0.169	0.181	0.111	0.084	0.054
9	0.170	0.183	0.112	0.085	0.215
10	0.171	0.186	0.112	0.086	0.572
11	0.172	0.187	0.116	0.087	0.572
12	0.171	0.188	0.117	0.088	0.572
13	0.170	0.187	0.115	0.086	0.215
14	0.170	0.186	0.115	0.085	0.572
15	0.170	0.187	0.115	0.084	0.286
16	0.171	0.187	0.117	0.083	0.279
17	0.173	0.189	0.118	0.085	0.086
18	0.173	0.190	0.119	0.086	0.059
19	0.174	0.191	0.118	-	0.050
20	0.173	0.189	0.115	-	0.061
21	0.171	0.186	0.112	-	0.181
22	0.170	0.185	0.110	-	0.077
23	0.169	0.183	0.109	-	0.043
24	0.167	0.182	0.108	-	0.037

جدول (۴): احتمال توقف خودروها در پارکینگ در زمان‌های مختلف

بازه زمانی (ساعت)	0-6	7-13	14-17	18-24
احتمال پارک خودرو	0.8	0.35	0.45	0.7



شکل (۳): مقدار تولید فتوولتاییک بر اساس تابش پیش‌بینی شده

جدول (۵): توزیع نرمال خطای پیش‌بینی تابش خورشید

انحراف معیار (درصدی از میانگین تابش پیش‌بینی شده)	میانگین خطا	ساعت
0.07	0	1-12
0.10	0	13-24

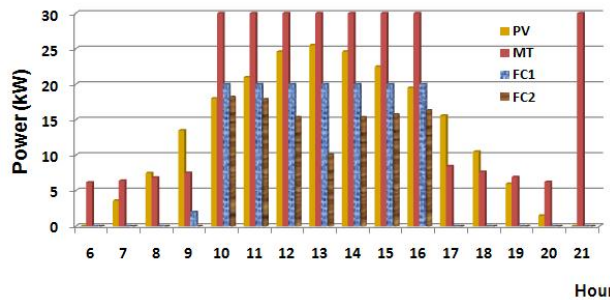
همچنین با توجه به میانگین مسافت پیموده شده در شبانه‌روز، مقدار مسیر طی شده در هر ساعتی که خودرو خارج از منزل می‌باشد به کمک توزیع یکنواخت $(0\text{ km}, 4\text{ km})$: U تخمین زده شده است. بر اساس اطلاعات دریافتی از [4] و [36]، میزان متوسط تولید فتوولتاییک در یک روز آفتابی در ماه ژوئن مطابق شکل (۳) پیش‌بینی می‌شود. برای لحاظ نمودن عدم قطعیت در پیش‌بینی تابش خورشید در روز آینده، از توزیع نرمال مطابق جدول (۵) استفاده شده است. با توجه به توزیع احتمال خطای پیش‌بینی و به کمک نمونه‌برداری، تعداد محدودی سناریوی مجزا برای تابش خورشید در روز آینده به دست آمده است. همچنین در این مساله فرض شده است که بهره‌بردار ریزشبه رزرو چرخان به میزان ۲۰ درصد تولید منابع تجدیدپذیر را برای مدیریت رخدادهای احتمالی ضروری می‌داند که باید توسط منابع محلی و خودروها تامین گردد [31].

از جایی که ریزشبه‌ی مورد مطالعه متصل به شبکه‌ی اصلی می‌باشد، این امکان وجود دارد تا کل یا بخشی از انرژی مورد نیاز از شبکه بالادستی خریداری گردد. با توجه به انگیزه اقتصادی، علاوه بر این که بار ناحیه می‌تواند توسط منابع محلی تامین گردد، ریزشبه قادر است تا در برخی زمان‌ها به شبکه‌ی اصلی انرژی بفروشد.

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی

تابع هدف و معادلاتی که در بخش‌های قبلی مورد بررسی قرار گرفتند به صورت یک برنامه‌ریزی احتمالی خطی مختلط با عدد صحیح در محیط GAMS شبیه‌سازی شده‌اند. از آنجا که میزان تبادل انرژی با شبکه باید در مرحله اول (یعنی قبل از شروع دوره بهره‌برداری) تعیین شود، مشخص شدن میزان دقیق پیش‌بینی‌ها در روز آینده تغییری را در این تصمیم به وجود نخواهد آورد. فقط متغیرهای کنترلی مرحله دوم هستند که می‌توانند با مشخص شدن دقیق اطلاعات در روز آینده (این که چه سناریویی به وقوع پیوسته است)، تغییر کنند. با توجه به فضای حاکم بر مساله‌ی مدیریت انرژی در روز آینده، این قابلیت وجود دارد تا متغیرهای مساله در این دو مرحله گنجانده شوند. در این شبیه‌سازی مقدار تبادل انرژی در ساعات مختلف، وضعیت شارژ و دشارژ باتری خودروها و همچنین در مدار قرار گرفتن واحدهای تولیدی به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری مرحله اول و همچنین مقدار توان تولیدی مولدها به عنوان متغیرهای کنترلی مرحله دوم در نظر گرفته شده‌اند.

شکل (۴-الف) وضعیت در مدار قرار گرفتن مولدهای ریزشبه را نشان می‌دهد. سلول‌های تیره رنگ بیانگر در مدار بودن واحدها در آن ساعات می‌باشند. قابل مشاهده است که مدیریت ریزشبه تمایل دارد تا در ساعاتی که قیمت برق نسبتاً گران می‌باشد، مولدها در مدار قرار بگیرند. باید توجه داشت در صورتی که فرض شود مساله فاقد عدم قطعیت بوده و مقدار تولید فتوولتاییک در روز آینده بدون خطا معلوم



شکل (۷): میانگین تولید مولدها برای سناریوهای مختلف

ساعات کار مولدها و دشارژ خودروها در اکثر اوقات همپوشانی دارند که طبق شکل (۶)، در این بازه زمانی شاهد کاهش خرید برق از شبکه‌ی اصلی و همچنین فروش برق به آن می‌باشیم. در این شکل مقدار بهینه‌ی تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، انگیزه‌ی اقتصادی موجب شده تا مدیریت ریزشبه علاوه بر این که انرژی مورد نیاز را از طریق منابع محلی و خودروهای الکتریکی تامین نماید، فروش انرژی به شبکه را نیز در برنامه قرار دهد. به کمک شکل‌های (۵) و (۶) می‌توان دریافت که الگوی شارژ و دشارژ خودروها با الگوی تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی مطابقت دارد. نتایج شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) در مرحله‌ی اول، یعنی روز قبل از بهره‌برداری ریزشبه، مورد استفاده قرار می‌گیرند و هر سناریویی که در روز آینده رخ دهد روی این نتیجه‌ها تاثیری نخواهد داشت.

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، مقدار تولید منابع تولید پراکنده در روز آینده، در گروه متغیرهای مرحله دوم می‌باشند. هنگامی که مساله‌ی دوم مرحله‌ای حل می‌شود، برای تصمیم‌گیری در مورد متغیرهای مرحله دوم باید منتظر بود تا مشخص گردد چه سناریویی در مرحله‌ی دوم رخ خواهد داد. شکل (۷) به طور نمونه میانگین تولید مولدها را برای سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

هر سه مولد قابل توزیع (MT، FC1 و FC2) در ساعات میانی روز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. در ساعات اوج قیمت برق، انتظار می‌رود مولدهای MT و FC1 با حداکثر ظرفیت خود کار کنند اما مولد FC2 با توجه به قیمت پیشنهادی بالاتر نسبت به دو مولد دیگر، بطور میانگین با ۷۵٪ ظرفیت خود بهره‌برداری می‌گردد. در بازه زمانی ساعت ۲۱ نیز قیمت برق مجدداً کمی افزایش را تجربه می‌کند و در این زمان فقط مولدی که قیمت پیشنهادی ارزان‌تری دارد، یعنی MT، بکار گرفته می‌شود. مولد FC1 در ساعت ۹ با حداقل تولید در مدار است. همچنین در ساعات ۶ الی ۹ و ۱۷ الی ۲۰ مولد MT با حداقل خروجی خود کار می‌کند. با توجه به شکل (۴) می‌توان دریافت که بهره‌برداری از مولدهای MT و FC1 در ساعات مذکور به دلیل وجود عدم قطعیت در تولید سیستم فتوولتائیک می‌باشد. هزینه‌ی مورد انتظار مدیریت انرژی پیشنهادی در این ریزشبه حدود ۳۷ دلار می‌باشد.

می‌باشد، آرایش در مدار بودن واحدها متفاوت خواهد بود که در شکل (۴-ب) آورده شده است. بنابراین برنامه‌ریزی احتمالی برای پاسخگویی به عدم قطعیت‌ها، این الزام را به وجود آورده است تا مولد MT1 به مدت چند ساعت بیشتر در مدار قرار داشته باشد.

میزان توان شارژ و دشارژ خودروها در شبانه‌روز در شکل (۵) نشان داده شده است. در ریزشبه‌ی مورد مطالعه، ظرفیت باتری خودروهای برقی نسبت به دیگر بارها و منابع شبکه قابل توجه بوده و برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها بخش مهمی از مدیریت انرژی ریزشبه تلقی می‌گردد. سیستم مدیریت انرژی ریزشبه تمایل دارد تا خودروها در زمانی که قیمت برق بالاتر است، دشارژ شوند. در بیشتر زمان‌ها بین ساعات ۹ الی ۱۶ شاهد دشارژ خودروها می‌باشیم؛ هرچند تعداد خودروهای متصل به شبکه در این ساعات کم می‌باشد. همچنین در ساعت ۲۱ که قیمت برق بالاتر از ساعات مجاور خود می‌باشد، مدیریت هوشمند انرژی تمایل به دشارژ خودروها داشته و چون که تعداد خودروهای بیشتری به شبکه متصل هستند توان قابل توجهی در این زمان به شبکه داده می‌شود.

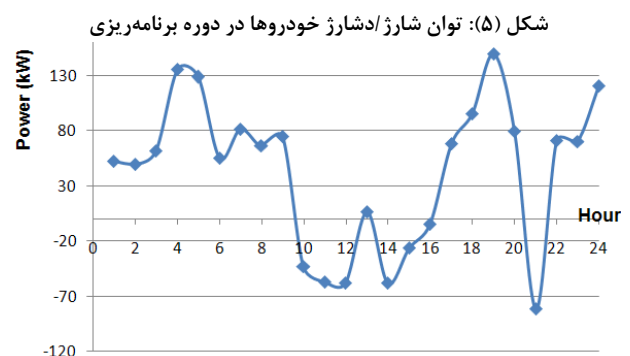
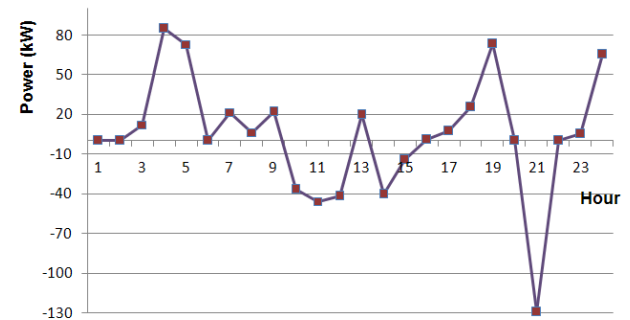
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
MT																		
FC1																		
FC2																		

(الف) *ساعاتی که در شکل آورده نشده است، مولدها خاموش هستند.

	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
MT																		
FC1																		
FC2																		

(ب)

شکل (۴): وضعیت در مدار قرار گرفتن منابع تولید (الف) با وجود عدم قطعیت در پیش‌بینی و (ب) با چشم‌پوشی از خطای پیش‌بینی



شکل (۶): میزان تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی

۵- نتیجه گیری

این مقاله به مدیریت انرژی در ریزشبه پرداخته است که دارای منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی می‌باشد. در این مساله بهره‌بردار ریزشبه با توجه به قیمت بازار انرژی، از روز قبل برای خرید (فروش) برق از (به) شبکه‌ی اصلی تصمیم‌گیری می‌نماید. در مدیریت انرژی پیشنهادی، رزرو مورد نیاز ریزشبه نیز در نظر گرفته شده است. با توجه به حضور منابع تجدیدپذیر و عدم قطعیت در تولید، از برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای برای تصمیم‌گیری استفاده شده است. برنامه‌ریزی مذکور این امکان را به بهره‌بردار ریزشبه می‌دهد تا قبل از معلوم شدن مقادیر غیرقطعی، بتواند برخی تصمیمات را به صورت قطعی اتخاذ نماید. با در نظر گرفتن یک سیستم نمونه، نتایج شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار GAMS بدست آمده و تحلیل شده است. در این برنامه‌ریزی مقدار انرژی مبادله شده با شبکه‌ی بالادستی، شارژ و دشارژ خودروها و همچنین درمداار قرار گرفتن منابع تولید پراکنده از روز قبل مشخص می‌گردند؛ اما در مورد مقدار توان تولیدی منابع تولید پراکنده در روز بهره‌برداری که رخداد دقیق سناریو مشخص می‌گردد، تصمیم‌گیری می‌شود.

نتایج نشان می‌دهند که سیستم مدیریت انرژی ریزشبه تحت شرایط وجود عدم قطعیت، مدت زمان استفاده از منابع محلی را افزایش می‌دهد تا هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار به حداقل برسد. همچنین در این برنامه‌ریزی، بهره‌بردار ریزشبه تمایل دارد که در ساعات اوج قیمت از قابلیت دشارژ خودروها استفاده نماید تا خرید انرژی از شبکه‌ی اصلی را به حداقل رسانده و حتی در برخی ساعات انرژی مزاد را به آن بفروشد.

مراجع

- [8] Bakhtyar, B., Fudholi, A., and et al, "Review of CO₂ price in Europe using feed-in tariff rates" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69, pp 685-691, 2017.
- [9] Zhang, P., Qian, K., et al, "A Methodology for Optimization of Power Systems Demand Due to Electric Vehicle Charging to Electric Vehicle Charging Load" *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 27, No.3, 2012.
- [10] Richardson, P., Flynn, D., et al, "Local versus Centralized Charging Strategies for Electric Vehicles in Low Voltage Distribution Systems", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 3, pp. 1020 – 1028, 2012.
- [11] Stroehle, P., Becher, S., et al, "The Impact of Charging Strategies for Electric Vehicles on Power Distribution Networks", *IEE Proc. Int. Conf. on the European Energy Market (EEM)*, Zagreb, pp. 51 – 56, 2011.
- [12] Bashash, S., and Fathy, H.K., "Cost-Optimal Charging of Plug-In Hybrid Electric Vehicles Under Time-Varying Electricity Price Signals", *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.15, pp. 1958 – 1968, 2014.
- [13] Zhang, P., Qian, K., et al, "A Methodology for Optimization of Power Systems Demand Due to Electric Vehicle Charging Load", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 27, pp. 1628 – 1636, 2012.
- [14] Zhang, M., and J. Chen, "The Energy Management and Optimized Operation of Electric Vehicles Based on Microgrid", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.29, pp. 1427 – 1435, 2014.
- [15] VDI-Guideline (2007) *VDI 4602*, Beuth Verlag, pp. 3-10.
- [16] Zakariazadeh, A., Jadid, S., et al, "Integrated operation of electric vehicles and renewable generation in a smart distribution system", *Energy Conversion and Management*, Vol.89, pp. 99–110, 2015.
- [17] Chen, C., Duan, S., et al, "Smart energy management system for optimal microgrid economic operation" *IET Renewable Power Generation*, Vol. 5, pp. 258–267, 2011.
- [18] Gast, N., Tomozei, D., et al, "Optimal Generation and Storage Scheduling in the Presence of Renewable Forecast Uncertainties", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 5, pp. 1328 – 1339, 2014.
- [19] Hytowitz, R.B., and Hedman, K.W., "Managing solar uncertainty in microgrid systems with stochastic unit commitment", *Electric Power Systems Research*, Vol. 119, pp. 111–118, 2015.
- [20] Dai, R., and Mesbahi, M., "Optimal power generation and load management for off-grid hybrid power systems with renewable sources via mixed-integer programming", *Energy Conversion and Management*, Vol. 73, pp. 234–244, 2013.
- [21] Tiwari, N., and Srivastava, L., "Generation scheduling and micro-grid energy management using differential evolution algorithm", *IEE Proc. Int. Conf. on on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Nagercoil, India, pp.1-7, 2016.
- [22] Banvait, H., Lin, X., et al "Plug-in Hybrid Electric Vehicle Energy Management System using Particle Swarm Optimization", *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 3, pp. 1-11, 2009.
- [23] Gast, N., Tomozei, D., et al "Optimal Generation and Storage Scheduling in the Presence of Renewable Forecast Uncertainties", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 5, pp. 1328 – 1339, 2014.
- [24] Ruoyang, L., Qiuwei, W., et al, "Distribution locational marginal pricing for optimal electric vehicle charging management", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 29, pp. 203 - 211, 2014.
- [25] Atzeni, I., Ordóñez, L.G., et al, "Demand-Side Management via Distributed Energy Generation and Storage Optimization", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 4, pp. 866 – 876, 2013.
- [26] Leterme, W., Ruelens, F., et al, "A Flexible Stochastic Optimization Method for Wind Power Balancing With PHEVs", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 5, pp. 1238 – 1245, 2014.
- [27] Setlhaolo, D., Xia, X., et al, "Optimal scheduling of household appliances for demand response", *Electric Power Systems Research*, Vol. 116, pp. 24-28, 2014.
- [28] Rastegar, M., Firuzabad, M. F., et al, "Load commitment in a smart home", *Applied Energy*, Vol. 96, pp. 45–54, 2012.
- [29] Taherpour, H., Niknam, T., et al, "A novel stochastic framework for energy management in renewable micro-grids considering uncertainty of measurement and forecasting", *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, Vol. 28, No. 3, pp. 999-1008, 2015.
- [1] Baker, A., Byrne, D., et al, *World Energy Outlook*. International Energy Agency, pp. 330-335, 2004.
- [2] Guerrero, J.M., Vasquez, et al 'Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems', *IEEE Trans. Industrial Electronics*, pp. 726–736, ., 2009.
- [۳] قاسمی، ابوالفضل، بانژاد، مهدی. رحیمیان، مرتضی. (۱۳۹۵)، برنامه‌ریزی احتمالی انرژی در ریزشبه با در نظر گرفتن عدم قطعیت انرژی‌های تجدیدپذیر، سی و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق، وزارت نیرو، تهران.
- [4] Ghasemi, A., Asrari, A., Zarif, M., Abdelwahed, S., "Techno-economic analysis of stand-alone hybrid photovoltaic-diesel-battery systems for rural electrification in eastern part of Iran-A step toward sustainable rural development" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 28, pp. 456–462, 2013.
- [5] Flick, T., and Morehouse, J., *Securing the Smart Grid: Next Generation Power Grid Security*, Syngress press, 2010.
- [6] Tushar, M. H. K., Assi, C., and et al "Smart Microgrids: Optimal Joint Scheduling for Electric Vehicles and Home Appliances", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 5, pp. 239 – 250, 2014.
- [7] He, Y., Wang, L., and Wang, J., *Handbook of CO₂ in Power Systems*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 53-75, 2012.

- [30] Saber, A.Y., and Venayagamoorthy, G.K., "Resource Scheduling Under Uncertainty in a Smart Grid with Renewables and Plug-in Vehicles", *IEEE Systems Journal*, Vol. 6, pp. 103 – 109, 2012.
- [31] Honarmand, M., Zakariazadeh, A., et al, "Integrated scheduling of renewable generation and electric vehicles parking lot in a smart microgrid", *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 745–755, 2014.
- [32] Honarmand, M., Zakariazadeh, A., et al, "Self-scheduling of electric vehicles in an intelligent parking lot using stochastic optimization", *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 352, pp. 449–467, 2015.
- [33] King, A. J., and Wallace S. W., *Modeling with Stochastic Programming*, Springer New York, pp. 33-39, 2012.
- [34] <https://www.vw.com/models/e-golf/>
- [35] Leou, C. Su, "Stochastic Analyses of Electric Vehicle Charging Impacts on Distribution Network", *Power Systems*, " *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 29, pp. 1055 – 1063, 2014.
- [36] NASA surface meteorology and solar energy. Available: (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>).

زیر نویس ها

- ¹ Vehicle-to-Grid
- ² Aggregator
- ³ Two-stage stochastic programming
- ⁴ Unit commitment
- ⁵ General Algebraic Modeling System
- ⁶ Microturbine
- ⁷ Fuel cell
- ⁸ Photovoltaic