برنامه‌ریزی احتمالی انرژی در ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه، 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 ریزشبکه 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.

واژه های کلیدی: ریزشبکه، 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.6.5]

۱- مقدمه

مساله‌ی انرژی یکی از عوامل بسیار مهم در توسعه‌ی جوامع بـه شـمار می‌رود و تـامین انـرژی پایـدار از مهـم‌تـرین چـالش‌هـای پـیش 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 تکنولوژی‌هـا در حـال اضافه شدن به شبکه‌های توزیـع مـی‌باشـند. در همـین راسـتا مفهـوم ریزشبکه‌ها برای مدیریت تکنولوژی‌های جدید پیشنهاد شـده‌انـد [2]. ریزشبکه‌ها سیستم‌های قدرت کوچک و مدرن هستند که وجود منابع مختلف تولید و ذخیره‌ساز در آن‌ها، فوایدی همچون کاهش هزینـه‌هـا، بهبود قابلیت اطمینان و کاهش انتشار گازهای آلاینده را مـی‌توانـد بـه همراه داشته باشد [3,4].

پس از مقررات زدایی از صـنعت بـرق، هوشمندسـازی شـبکه یکـی از جدیدترین پیشنهاداتی بوده که در سیستم قدرت مطـرح شـده اسـت. شبکه‌های هوشمند برای انتقال و توزیع بهینه‌ی برق از سـوی تـامین-کنندگان 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 موضـوع آلـودگی هـوا، بسـیاری از کشـورها سیاسـت کاهش انتشار گازهای آلاینده را در پیش گرفته‌انـد [7]. ایـن موضـوع موجب شده است تا تکنولوژی‌های تولید پراکنده و منـابع تجدیدپـذیر بسیار مورد توجـه قـرار بگیرنـد تـا جـایی کـه بـرای اسـتفاده از ایـن سیستم‌ها، مشوق‌های مالی در نظر گرفته می‌شود [8]. با توجه به سهم بالای بخش حمل و نقل در تولید آلاینده‌ها، پیش‌بینـی مـی‌شـود کـه خودروهای الکتریکی مدرن با قابلیـت شـارش تـوان بـه سـمت شـبکه (V2G[1]) در آینده‌ای نزدیک از اجـزای مهـم شـبکه‌هـای الکتریکـی و حمل و نقل به شمار بروند [9]. شارژ بدون کنترل این خودروها ممکن است مشکلاتی را در پی داشته باشد؛ در حـالی کـه اگـر ایـن کـار بـه صورت برنامه‌ریزی‌شده انجام شود، می‌تواند به حل برخـی از مشـکلات شبکه کمک کند [10]. این عوامل باعث شده‌انـد تـا مـدیریت شـارژ / دشارژ خودروهای الکتریکی در مراجع مختلفی مورد مطالعه قرار بگیرد. به عنـوان نمونـه در [11] اسـتراتژی‌هـای مختلـف شـارژ خودروهـای الکتریکی شامل شارژ بدون کنترل و کنترل هوشمند با قابلیـت V2G، مورد بررسی قرار گرفته است. در [12] معادلات مربوط بـه دینامیـک-های مکانیکی خودرو و همچنین تلفات بـاتری نیـز در شـارژ بهینـه‌ی خودروها لحاظ شده‌اند. مرجع [13] با استفاده از یک مـدل اسـتاتیکی برای بارهای مربوط به شارژ خودروها، شـیوه‌ای بـرای مـدیریت انـرژی مصرفی خودروهای الکتریکی ارایه نموده است. در [14]، استراتژی‌های بهینه‌ی استفاده از خودروهای الکتریکی و ایستگاههای تعـویض بـاتری خودرو در یک ریزشبکه‌ی هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است. برای ایجاد هماهنگی میان شارژ خودروها و ایستگاههای تعـویض بـاتری، از مدل مبتنی بر قیمت استفاده شده که هدف آن حداقل‌سازی هزینـه‌ی شارژ خودروها و حداکثرسازی سود ایستگاه ها بوده است.

یکی از مسایل مهمی که همواره در سیستم‌های انرژی مورد توجه بوده است، بحث مدیریت انرژی می‌باشـد. طبـق تعریـف انجمـن مهندسـان آلمان، مدیریت انرژی شامل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری واحدهای تولید و مصرف انرژی است؛ به طوری که نیازها تامین گردند و اهـداف زیسـت محیطی و اقتصادی برآورده شوند [15]. در طی سالیان اخیر مطالعات زیادی بر روی مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها انجام شده است و مراجـع مختلفی مانند [16-19] مدیریت تولید و بـار را در ریزشـبکه‌هـا مـورد بررسـی قـرار داده‌انـد. بسـیاری از ایـن مطالعـات یـک مـدل را بـرای برنامه‌ریزی انرژی ارایه داده و به شیوه‌های مختلف آن را حل نمـوده و مورد تحلیل قرار داده‌اند. به عنوان نمونه [17] به کمـک برنامـه‌ریـزی خطی مختلط بـا عـدد صـحیح مـدلی را بـرای مـدیریت تولیـد، بـار و ذخیـره‌سـازی پیشـنهاد داده اسـت. در مسـایل برنامـه‌ریـزی انـرژی، معیارهای مختلفی به عنوان تابع هدف مورد اسـتفاده قـرار گرفتـه‌انـد. مراجع بسیاری از جمله [17,20]، حداقل‌سازی هزینـه‌ی انـرژی را بـه عنوان تابع هدف در نظر گرفته‌اند. هر چند معیارهایی ماننـد حـداقل-سازی آلاینـدگی [21]، حـداقل نمـودن مصـرف سـوخت خودروهـای هیبریـدی [22]، حـداقل‌سـازی تلفـات سیسـتم [23] و همچنـین حداکثرسازی رفاه اجتماعی [24] نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند.

مرجع [25] به برنامه‌ریزی انرژی روز آینـده در ریزشـبکه‌ی هوشـمند پرداخته است که در آن برخی از مصرف‌کننـدگان دارای منـابع تولیـد پراکنده و ذخیره‌کننده بوده و قـادر بـه شـرکت در برنامـه‌ی مـدیریت مصرف با هدف کاهش هزینه‌ها می‌باشـند. در [26] یـک مـدل خطـی مختلط با عدد صحیح برای استفاده از واحدهای تولیـد پراکنـده ارایـه شده و تاثیر خودروی الکتریکی به عنوان بار پاسخگو بـر روی هزینـه‌ی تولید، مورد مطالعه قرار گرفته است. در [27] نیز از طریق برنامه‌ریـزی وسایل مصرفی مشترکان خانگی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ی انـرژی، مدیریت بار در شبکه‌ی هوشمند با تعرفه‌ی انرژی غیرثابت مورد مطالعه قرار گرفته است. در همین راستا، [28] نیـز یـک روش بهینـه را بـرای ورود و خروج بارهای مشترکان خانگی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های انرژی ارایه نموده است.

پـیش‌بینـی نمـودن برخـی پارامترهـا در آینـده ، ماننـد تولیـد منـابع تجدیدپذیر و بار، همواره با خطا همراه می‌باشد که این موضوع می‌تواند برنامه‌ریزی انرژی را با چالش روبرو کند[3]. مطالعات مختلف از روش-های متعددی برای تحلیل عدم قطعیت اسـتفاده کـرده‌انـد. بـه عنـوان نمونه در [19] یک شیوه احتمالی برای مـدیریت انـرژی در ریزشـبکه ارایه شده که در آن تولید منابع تجدیدپـذیر نیـز لحـاظ گشـته اسـت. مساله از نوع برنامه‌ریزی خطی مختلط با عدد صحیح بوده که به کمک تجزیه بندرز حل شده است. مرجع [23] با لحاظ نمودن عدم قطعیـت منابع تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی تولیـد و ذخیـره را انجـام داده و از تـابع چند هدفه که دارای دو بخش تلفات و رزرو می‌باشـد، اسـتفاده نمـوده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.6.5]

است. همچنین در [29] نیز یک برنامه‌ریزی احتمالی انرژی در ریزشبکه پیشنهاد شده است که تکنولوژی‌های مختلف تولید پراکنده، منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها در نظر گرفته شده و مساله برنامه-ریزی 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 آلایندگی ارایه داده است. مرجع [31] مدیریت منابع انرژی در ریزشبکه 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 ریزشبکه که دارای پارکینگ‌های هوشمند می‌باشد، پیشنهاد شده است. برخی از مطالعات مانند [16] نیز در برنامه‌ریزی‌ها از مفهوم تجمیع‌کننده یا اگریگیتور[۲] به عنوان یک عامل واسطه میان مصرف‌کنندگان و بهره‌بردار شبکه استفاده نموده‌اند.

مقاله‌ی حاضر به مطالعه‌ی مدیریت انرژی در ریزشبکه می‌پردازد که دارای منابع تولید پراکنده، بار مصرفی و همچنین خودروهای الکتریکی با قابلیت V2G می‌باشد. این ریزشبکه 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 ریزشبکه 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[۴])
- لحاظ نمودن عدم قطعیت تولید و توسعه‌ی برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای.

در این مطالعه فرض شده است که سیستم مدیریت انرژی ریزشبکه به قیمت‌های بازار روز آینده دسترسی دارد [32,31]. 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.

۲- مدیریت انرژی در ریزشبکه

با بکارگیری منابع مختلف تولید و همچنین بارهای پاسخگو در ریزشبکه‌ها، 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 ریزشبکه ، 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 ریزشبکه موظف به تامین کل بار مصرفی ریزشبکه، 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:

$$Min \quad F=\sum_{t}\left(C_t^{grid}+C_t^{DG}+C_t^{SU}+C_t^{EV}\right) \qquad (۱)$$

که $C_t^{grid}, C_t^{DG}, C_t^{SU}, C_t^{EV}$ 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 ریزشبکه می‌تواند به شبکه‌ی اصلی متصل باشد یا این که به صورت مستقل کار کند. در صورت متصل بودن به شبکه‌ی بالادست، ریزشبکه علاوه بر دریافت انرژی، می‌تواند تولید مازاد خود را نیز به شبکه تحویل دهد. مقدار توان تبادلی با شبکه‌ی اصلی (P_t^{grid}) دارای محدودیت می‌باشد:

$$P_{\min}^{grid} \le P_t^{grid} \le P_{\max}^{grid} \qquad (۲)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.6.5]

که $P_{\min}^{grid}, P_{\max}^{grid}$ به ترتیب حداکثر و حداقل توان تبادلی می‌باشند. همچنین با توجه به شارش توان یکطرفه یا دوطرفه، حد پایین توان تبادلی 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:

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

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 ریزشبکه در هر لحظه یا از شبکه انرژی دریافت می‌کند یا به آن تزریق می‌نماید، از متغیر باینری α_t کمک گرفته شده است.

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

به واسطه‌ی وجود متغیر α در (۴)، تابع هدف (۱) غیر خطی خواهد بود. برای اجتناب از غیر خطی شدن تابع هدف، توان تبادلی 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 تبادلی با شبکه‌ی اصلی نمی‌تواند از مقدار حداکثر $P_{\max}^{grid}$ تجاوز نماید. بنابراین می‌توان آن‌ها را به صورت (۷.الف) تا (۷.ج) مدل نمود.

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

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

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

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

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

- 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.

$$C_{\text{t}}^{\text{DG}} = \sum_j \pi_{j,t}^{DG} P_{j,t}^{DG}.\Delta t \quad (۹)$$

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

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

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

که هزینه $SUC_{j,t}$ بابت راه‌اندازی شدن واحد j در زمان t می‌باشد. متغیر باینری $w_{j,t}$ در مدار بودن (=۱) و خارج از مدار بودن (=۰) 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 ریزشبکه 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.

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

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 فتوولتاییک 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 فتوولتاییک را تخمین زد.

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

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

P_t^{pv} توان خروجی فتوولتاییک (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 فتوولتاییک (مترمربع) می‌باشند.

- خودروی الکتریکی

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

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

که $P_{i,t}^{gen}$ و $\pi_{i,t}^{EV}$ به ترتیب توان تحویلی و قیمت پیشنهادی خودروی i در بازه زمانی tام 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.

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.6.5]

$$E_{i,t} - E_{i,t-1} = -d_t \times E_{i,t}^{trip} \qquad (۱۴-ب)$$

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:

$$E_{\mathrm{i,min}} \le E_{i,t} \le E_{\mathrm{i,max}} \qquad (۱۵)$$

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.

$$0 \le P_{i,t}^{gen} \le con_{i,t} \times r_{i,t} \times P_{i,\max} \qquad (۱۶)$$

$$0 \le P_{i,t}^{ch} \le con_{i,t} \times s_{i,t} \times P_{i,\max} \qquad (۱۷)$$

$$r_{i,t} + s_{i,t} \le 1, \quad s,r \in \{1,0\} \qquad (۱۸)$$

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 در زمان $t = k$ به شبکه متصل است.

- تامین بار و رزرو

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

$$D_t + \sum_i P_{i,t}^{ch} - \sum_i P_{i,t}^{gen} - \sum_j P_{j,t}^{DG} - P_t^{grid} = 0 \qquad (۱۹)$$

که D_t میزان بار مصرفی در زمان t می‌باشد.

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

$$R_t^{DG} + R_t^{EV} \ge R_{tot,t} \qquad (۲۰)$$

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 ریزشبکه در زمان t می‌باشد.

$$R_t^{DG} = \sum_j w_{j,t} . P_{j,\max}^{DG} - \sum_j P_{j,t}^{DG} \qquad (۲۱)$$

$$R_t^{EV} = \sum_i con_{i,t} . \min\left\{ \left(\frac{E_{i,t} - E_{i,\min}}{\Delta t} \right), P_{i,\max} \right\} \qquad (۲۲)$$

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.

$$P_{j,t}^{DG} + R_{j,t}^{DG} \le w_{j,t} . P_{j,\max}^{DG} \qquad (۲۳)$$

۳- برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای

عواملی مانند استفاده از منابع تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی انرژی در ریزشبکه 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 دقیقا 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه در مرحله اول برای میزان خرید انرژی از بازار روز آینده بطور قطعی تصمیم می‌گیرد؛ در حالی که میزان دقیق تولید فتولتاییک در روز آینده مشخص خواهد شد. به منظور تصمیم‌گیری در محیط غیرقطعی معمولا از یک توزیع احتمال استفاده می‌شود که خطای پیش‌بینی را نشان می‌دهد. از جایی که درنظر 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 برنامه ریزی احتمالی خطی دو مرحله ای به صورت (۲۴) می‌باشد [33]:

$$\min_x \left\{ \mathrm{c}^{\mathrm{T}} x + \mathrm{E}_\omega \left[Q(x,\omega) \right] \right\} \qquad (۲۴)$$

$$s.t \quad Ax \ge b, \; x \ge 0$$

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 بترتیب ماتریس و

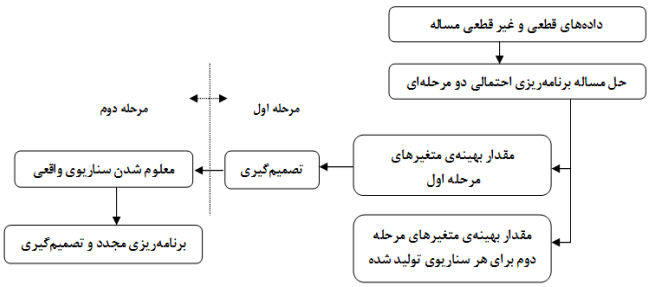
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.6.5]

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.

$$Q(x,\omega)=\min_{y}\ q_{\omega}^{T}y \qquad (۲۵)$$
$$s.t\quad T_{\omega}x+W_{\omega}y\geq h_{\omega}\ ,\quad y\geq 0$$

$y\in R^{m}$ بردار متغیرهای تصمیم گیری 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 دومرحله‌ای

در این مقاله به کمک نمونه‌برداری، تعداد محدودی سناریو برای تابش خورشید در روز آینده در نظر گرفته شده است. انرژی تبادلی 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 ریزشبکه 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:

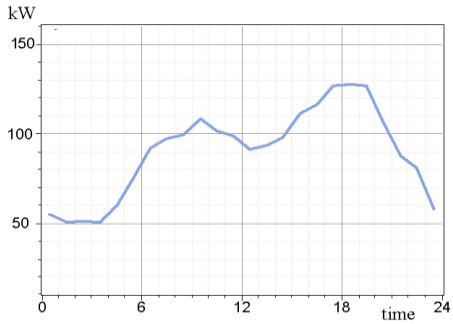
$$C_{t,\omega}^{DG}=\overbrace{\sum_{j}\pi_{j,t}^{DG}P_{j,t,\omega}^{DG}\times\Delta t}^{\text{2nd stage}} \qquad (۲۶)$$

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 ریزشبکه‌ی مورد مطالعه مطابق با شکل (۲) می‌باشد. منابع تولید پراکنده موجود در این ریزشبکه میکروتوربین (MT[۶])، دو پیل سوختی[۷] (FC1 , FC2) و فتوولتاییک (PV[۸]) می‌باشند. مشخصات فنی مولدها نیز در جدول (۱) نشان داده شده است[17].

در این ریزشبکه 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 ریزشبکه

جدول(۱): مشخصات مولدهای ریزشبکه

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 ریزشبکه، 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.6.5]

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

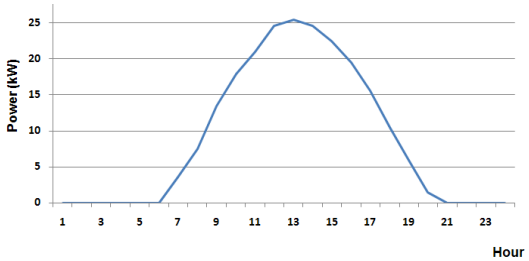
با توجه به عدم قطعیت موجود در سطح انرژی باتری خودروها هنگامی که برای اولین بار به شبکه متصل می‌شوند، مقدار شارژ اولیه خودروها می‌تواند توسط توزیع احتمالی محاسبه گردد. به این منظور از توزیع یکنواخت در بازه‌ی $(E_{\min}, 0.5E_{\max})$ برای تخمین سطح اولیه‌ی شارژ خودروها هنگام متصل شدن به شبکه استفاده شده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

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

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

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

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

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 $U:(0\ km, 4\ km)$ 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه‌ی 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، ریزشبکه قادر است تا در برخی زمان‌ها به شبکه‌ی اصلی انرژی بفروشد.

۴-۲- نتایج شبیه سازی

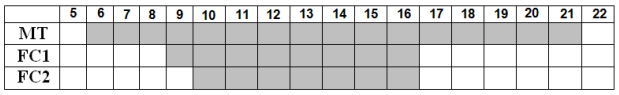
تابع هدف و معادلاتی که در بخش‌های قبلی مورد بررسی قرار گرفتند به صورت یک برنامه‌ریزی احتمالی خطی مختلط با عدد صحیح در محیط GAMS شبیه‌سازی شده‌اند. از آنجا که میزان تبادل انرژی با شبکه باید در مرحله اول (یعنی قبل از شروع دوره بهره‌برداری) تعیین شود، مشخص شدن میزان دقیق پیش‌بینی‌ها در روز آینده تغییری 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 ریزشبکه را نشان می‌دهد. سلول‌های تیره رنگ بیانگر در مدار بودن واحدها در آن ساعات می‌باشند. قابل مشاهده است که مدیریت ریزشبکه تمایل دارد تا در ساعاتی که قیمت برق نسبتا 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

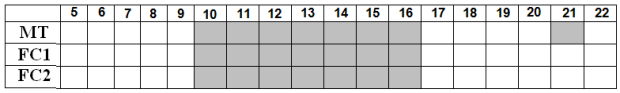
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.6.5]

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 ریزشبکه‌ی 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 ریزشبکه تلقی می‌گردد. سیستم مدیریت انرژی ریزشبکه 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.

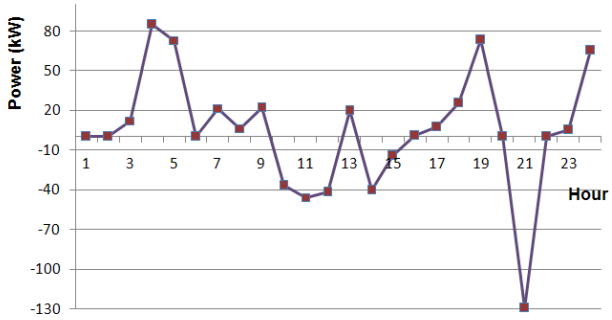


(۴.الف) *ساعاتی که در شکل آورده نشده است، مولدها خاموش هستند.

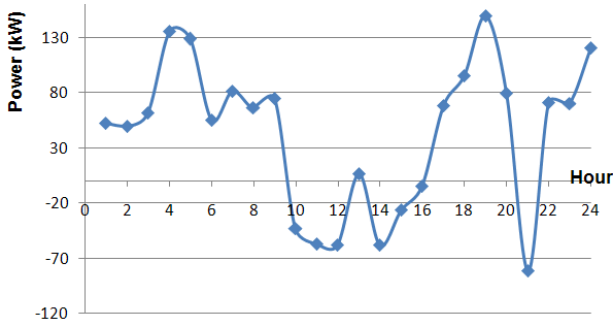


(۴.ب)

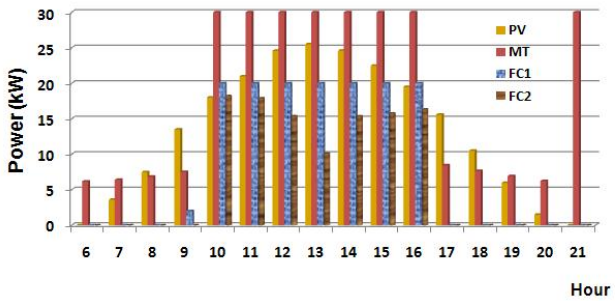
شکل (۴): وضعیت در مدار قرار گرفتن منابع تولید الف) با وجود عدم قطعیت در پیش‌بینی و ب) با چشم‌پوشی از خطای پیش‌بینی



شکل (۵): توان شارژ/دشارژ خودروها در دوره برنامه‌ریزی



شکل (۶): میزان تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی



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 ریزشبکه 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 ریزشبکه، مورد استفاده قرار می‌گیرند و هر سناریویی که در روز آینده رخ دهد روی این نتیجه‌ها تاثیری نخواهد داشت.

همانطور که قبلا نیز اشاره شد، مقدار تولید منابع تولید پراکنده در روز آینده، در گروه متغیرهای مرحله دوم می‌باشند. هنگامی که مساله‌ی دومرحله‌ای 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 مجددا 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 فتوولتاییک می‌باشد. هزینه‌ی مورد انتظار مدیریت انرژی پیشنهادی در این ریزشبکه حدود ۳۷ دلار می‌باشد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.6.5]

۵- نتیجه گیری

این مقاله به مدیریت انرژی در ریزشبکه پرداخته است که دارای منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی می‌باشد. در این مساله بهره‌بردار ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 درمدار 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، تصمیم گیری می‌شود.

نتایج نشان می‌دهند که سیستم مدیریت انرژی ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 مازاد را به آن بفروشد.

مراجع

[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 ریزشبکه با درنظر 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 CO_2 in Power Systems*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 53-75, 2012.

[8] Bakhtyar, B., Fudholi, A., and et al, "Review of CO_2 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., Ordonez, 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] Taherpoor, 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.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.6.5]

[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/⟩.

زیرنویس‌ها

[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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.6.5]