



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق

گروه قدرت

رساله دکتری مهندسی برق - قدرت

مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ی هوشمند با حضور خودروهای الکتریکی

نگارنده:

ابوالفضل قاسمی

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

استاد مشاور:

دکتر مرتضی رحیمیان

تابستان ۹۷

شماره: ۱۵۷۴.۱.۰۰۱

تاریخ: ۲۰ خرداد ۹۷

ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم ابوالفضل قاسمی دانشجوی دکتری رشته برق - قدرت به شماره دانشجویی ۹۱۲۴۸۶۵

ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۱ در تاریخ ۱۳۹۷/۰۴/۲۰ از رساله نظری / عملی خود با عنوان:

مدیریت انرژی در ریز شبکه ی هوشمند با حضور خودروهای الکتریکی

دفاع و با اخذ نمره ۱۹/۳ به درجه: عالی..... نائل گردید.

<input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷ <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵ <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد <input type="checkbox"/>	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر صهوی باجراد	استاد/اساتید راهنما	دانشیار	
۲	دکتر مرتضی رحیمین	مشاور/ مشاورین	دانشیار	
۳	دکتر رحمت اله هدرسنه	استاد مدعو داخلی / خارجی	استاد	
۴	دکتر محسن اصیلی	استاد مدعو داخلی / خارجی	استاد	
۵	دکتر حمید طوسیان عاقل	استاد مدعو داخلی / خارجی	دانشیار	
۶	دکتر امید حسن بیضا	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای/ خانم

ابوالفضل قاسمی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خداوند را که به من نعمت آموختن عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید. اکنون که با یاری خداوند متعال به پایان تحصیلات خود رسیدم، بر خود لازم می‌دانم که مراتب تشکر و قدردانی را از همه‌ی بزرگوارانی که بنده را در انجام این پژوهش یاری نمودند، اعلام نمایم. از زحمات استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر مهدی بانژاد که بدون راهنمایی‌های ایشان انجام این رساله میسر نبود، کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای دکتر مرتضی رحیمیان که زحمت مشاوره‌ی این رساله را متقبل شدند و در تمام مراحل انجام پژوهش از هیچ کمکی دریغ نکردند، صمیمانه سپاسگزارم.

و در نهایت برای خانواده‌ی عزیزم که همواره پشتیبان من بودند و همچنین برای تمامی دوستانم که در طول دوران تحصیل از وجودشان بهره بردم، آرزوی بهترین‌ها را دارم.

تعهد نامه

اینجانب **ابوالفضل قاسمی** دانشجوی دوره دکتری رشته برق - قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده‌ی رساله با عنوان **مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ی هوشمند با حضور خودروهای الکتریکی** تحت راهنمایی آقای **دکتر مهدی بانزاد** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۹۷/۶/۲۰

ابوالفضل قاسمی

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

مدیریت انرژی همواره به عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل در بخش انرژی مطرح بوده است. طی سالیان اخیر، توسعه‌ی مفاهیمی مانند ریزشبكة و هوشمندسازی شبکه‌های انرژی موجب شده است تا منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر با سرعت بیشتری به سیستم‌های قدرت اضافه شوند. همچنین با توجه به میزان عرضه‌ی خودروهای الکتریکی در بازارهای جهانی، می‌توان انتظار داشت که این خودروها در آینده‌ای نزدیک به طور قابل توجهی وارد شبکه شوند. حضور منابع متعدد و بارهایی مانند خودروهای الکتریکی در شبکه‌های توزیع می‌تواند مدیریت انرژی را با چالش‌هایی روبرو کند.

این رساله مدیریت انرژی در ریزشبكة‌ی هوشمند را با حضور خودروهای الکتریکی مورد بررسی قرار می‌دهد. مدیریت انرژی، بهره‌برداری از واحدهای تولید و مصرف انرژی را به گونه‌ای انجام می‌دهد تا یک سری اهداف مانند اهداف اقتصادی و زیست محیطی برآورده شوند. مساله‌ی مدیریت انرژی در این رساله همواره از دیدگاه مالک ریزشبكة (مانند یک مجتمع دانشگاهی شامل خودروهای الکتریکی) مدل‌سازی می‌شود که به دنبال بهینه کردن هدف خود می‌باشد. در همین راستا، ابتدا برنامه‌ریزی انرژی خودروهای الکتریکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با مدیریت خودروهای الکتریکی مدرن می‌توان زمان‌های شارژ/دشارژ خودروها را در طول شبانه‌روز جابجا نمود. در ادامه، مساله‌ی مدیریت انرژی برای یک ریزشبكة با حضور خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر بیان می‌شود که در آن عدم قطعیت‌ها به کمک برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای مدل می‌شوند. این رساله از مفهوم هاب انرژی نیز برای برنامه‌ریزی انرژی در یک ریزشبكة استفاده می‌کند. با استفاده از هاب انرژی، سیستم مدیریت انرژی ریزشبكة قادر خواهد بود تا زیرساخت‌های مختلف انرژی را بصورت توأمان در برنامه‌ریزی تاثیر دهد. در مدل پیشنهادی، چندین سناریوی محدود برای عدم قطعیت مربوط به بار و تولید در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در ادامه، تاثیر عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی بر روی بهره‌برداری از ریزشبكة‌ی انرژی و همچنین نقش خودروهای الکتریکی بر روی سود بهره‌برداری سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت انرژی، از روش مونت کارلو

استفاده می‌شود و به منظور کمی سازی ریسک مربوط به سود بهره‌برداری، معیار ضریب تغییر (CoV) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تمامی مدل‌ها و روش‌های پیشنهادی در این رساله بر روی سیستم‌های نمونه شبیه‌سازی می‌شوند و نتایج شبیه‌سازی، صحت و کارایی روش‌های پیشنهادی را تایید خواهند کرد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت انرژی، تولید پراکنده، برنامه‌ریزی تصادفی، خودروهای الکتریکی.

مقالات مستخرج از رساله

مجلات:

۱. ابوالفضل قاسمی، مهدی بانژاد، مرتضی رحیمیان، "برنامه‌ریزی احتمالی انرژی در ریزشبکه شامل خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، ۱۳۹۶، شماره ۶ (۱۲)، صفحات ۴۶-۵۵.
2. Ghasemi, A., Banejad, M., Rahimiyan, M.: 'Integrated energy scheduling under uncertainty in a micro energy grid', IET Gener. Transm. & Distrib., 2018, 12, (12), pp. 2887 – 2896.

کنفرانس‌ها:

۱. ابوالفضل قاسمی، مهدی بانژاد، مرتضی رحیمیان، "برنامه‌ریزی احتمالی انرژی در ریزشبکه با در نظر گرفتن عدم قطعیت انرژی‌های تجدیدپذیر"، سی و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق - تهران - ۱۳۹۶.
۲. ابوالفضل قاسمی، مهدی بانژاد، "مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی در ریزشبکه توسط هاب انرژی"، بیست و یکمین کنفرانس توزیع برق - کرج - ۱۳۹۵.
۳. ابوالفضل قاسمی، مهدی بانژاد، "مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی در ریزشبکه‌ی هوشمند"، سومین همایش محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، ۱۳۹۴، تهران.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱ اهمیت تحقیق.....	۲
۲-۱ اهداف تحقیق.....	۳
۳-۱ نوآوری های تحقیق.....	۵
۴-۱ ساختار رساله.....	۶
فصل دوم: ریز شبکه ها و مدیریت انرژی.....	۹
۱-۲ مقدمه.....	۱۰
۲-۲ ریز شبکه.....	۱۱
۳-۲ شبکه ی هوشمند.....	۱۳
۱-۳-۲ ساختار شبکه ی هوشمند.....	۱۴
۲-۳-۲ دلایل استفاده از شبکه های هوشمند.....	۱۶
۳-۳-۲ بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر.....	۱۶
۴-۲ نفوذ خودروهای الکتریکی به شبکه.....	۱۷
۵-۲ مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی.....	۱۹
۶-۲ بکارگیری روش های مختلف در مدیریت انرژی خودروی الکتریکی.....	۲۳
۷-۲ مدیریت انرژی در ریز شبکه شامل خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر.....	۲۵
۱-۷-۲ پارکینگ های هوشمند.....	۲۹
۲-۷-۲ وارد مدار کردن منابع تولید.....	۳۱
۳-۷-۲ مدیریت انرژی در سمت مصرف و خانه ی هوشمند.....	۳۴
۸-۲ سیستم های انرژی با حامل های متعدد.....	۳۸
۹-۲ مدیریت هاب انرژی.....	۴۰
۱۰-۲ جمع بندی.....	۴۶
فصل سوم: مدیریت انرژی ریز شبکه با وجود خودروهای الکتریکی.....	۴۷
۱-۳ مقدمه.....	۴۸
۲-۳ بخش (الف). برنامه ریزی شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی.....	۵۰
۱-۲-۳ مدل شارژ/دشارژ خودروی الکتریکی.....	۵۰
۲-۲-۳ برنامه ریزی خودروهای الکتریکی.....	۵۲
۳-۲-۳ تابع هدف برنامه ریزی بهینه.....	۵۳
۳-۲-۴ بررسی یک سیستم نمونه.....	۵۳
۳-۳ بخش (ب). مدیریت انرژی در ریز شبکه با حضور خودروهای الکتریکی.....	۵۸
۱-۳-۳ تشریح تابع هدف و قیود حاکم بر مساله.....	۵۹
۳-۳-۲ برنامه ریزی تصادفی دو مرحله ای.....	۶۳
۳-۳-۳ بررسی یک سیستم نمونه.....	۶۶
۳-۳-۴ نتایج شبیه سازی.....	۷۰
۴-۳ نتیجه گیری و جمع بندی.....	۷۵

۷۷.....	فصل چهارم: برنامه‌ریزی تصادفی انرژی در ریزشبهه شامل حامل‌های متعدد انرژی
۷۸.....	۱-۴ مقدمه
۷۸.....	۲-۴ اهمیت یکپارچه‌سازی سیستم‌های انرژی
۸۱.....	4-3 مدل‌سازی هاب انرژی
۸۵.....	۴-۴ اهمیت و اهداف برنامه‌ریزی یکپارچه در ریزشبهه‌ی انرژی
۸۷.....	۵-۴ ساختار ریاضی مساله
۸۷.....	۱-۵-۴ هاب انرژی
۸۸.....	۲-۵-۴ محدودیت‌های هاب انرژی
۸۹.....	۳-۵-۴ ذخیره‌کننده‌ها
۹۰.....	۴-۵-۴ غیرخطی شدن مساله با وجود ضرایب توزیع
۹۱.....	۵-۵-۴ MUT و MDT در مساله‌ی ورود/خروج واحدها از مدار
۹۳.....	4-6 در نظر گرفتن عدم قطعیت
۹۴.....	۱-۶-۴ تولید سناریو
۹۵.....	۲-۶-۴ برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای
۹۸.....	۷-۴ بررسی یک سیستم نمونه:
۱۰۹.....	۸-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۱۱.....	فصل پنجم: بررسی تاثیر عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی بر روی بهره‌برداری ریزشبهه
۱۱۲.....	۱-۵ مقدمه
۱۱۲.....	۲-۵ اهمیت مساله
۱۱۳.....	۳-۵ برنامه‌ریزی انرژی در ریزشبهه
۱۱۶.....	۴-۵ عدم قطعیت قیمت
۱۱۹.....	۵-۵ آنالیز حساسیت
۱۲۱.....	۶-۵ بررسی سیستم نمونه
۱۲۴.....	۷-۵ نتایج برنامه‌ریزی انرژی - قیمت قطعی
۱۲۶.....	۱-۷-۵ تاثیرات عدم قطعیت قیمت
۱۲۷.....	۲-۷-۵ بررسی حضور DG و خودروها
۱۲۹.....	۳-۷-۵ نتایج آنالیز حساسیت
۱۳۱.....	۸-۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۳۳.....	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۳۴.....	۱-۶ نتیجه‌گیری
۱۳۶.....	۲-۶ پیشنهادات
۱۳۷.....	مراجع

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱	مراحل تکمیل انجام مدیریت انرژی در ریزشبکه	۵
جدول ۱-۳	قیمت خرید برق	۵۵
جدول ۲-۳	مشخصات خودروی الکتریکی	۵۵
جدول ۳-۳	الگوی اتصال خودروها به شبکه	۵۵
جدول ۴-۳	مشخصات مولدهای ریزشبکه	۶۷
جدول ۵-۳	مشخصات خودروهای الکتریکی	۶۸
جدول ۶-۳	قیمت پیشنهادی منابع تولید	۶۸
جدول ۷-۳	احتمال توقف خودروها در پارکینگ در زمان‌های مختلف	۶۹
جدول ۸-۳	توزیع نرمال خطای پیش‌بینی تابش خورشید	۷۰
جدول ۱-۴	مشخصات سیستم	۹۹
جدول ۲-۴	توزیع احتمال گسسته برای خطای پیش‌بینی بار مصرفی و تابش خورشید	۱۰۰
جدول ۳-۴	قیمت بازار انرژی	۱۰۱
جدول ۴-۴	وضعیت در مدار قرار گرفتن DG ها	۱۰۳
جدول ۵-۴	وضعیت در مدار قرار گرفتن DG ها - برنامه‌ریزی تصادفی	۱۰۷
جدول ۶-۴	وضعیت در مدار قرار گرفتن DG ها - بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت	۱۰۸
جدول ۱-۵	کلاس‌بندی سیستم‌های مورد مطالعه	۱۲۱
جدول ۲-۵	مشخصات سیستم مورد مطالعه	۱۲۱
جدول ۳-۵	پارامترهای مربوط به تابع چگالی احتمال و ضریب تغییر	۱۲۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱. بخش‌های مرتبط با مدیریت انرژی در ریزشبکه ۴
- شکل ۱-۲. ساختار ریز شبکه‌ی هوشمند ۱۴
- شکل ۲-۲. توزیع احتمال مسافت خودروها در طول شبانه‌روز ۲۲
- شکل ۳-۲. تبادل اطلاعات میان مالکان خودروها، تجمیع‌کننده و بهره‌بردار ۲۷
- شکل ۴-۲. تبادل انرژی و اطلاعات در ریزشبکه دارای پارکینگ هوشمند ۲۹
- شکل ۵-۲. تبادل اطلاعات در مدل خود-برنامه‌ریزی پارکینگ هوشمند ۳۰
- شکل ۶-۲. تبادل اطلاعات میان شبکه‌ی هوشمند و یک مشترک فعال ۳۵
- شکل ۷-۲. ساختار تبادل اطلاعات بین بازار انرژی و مصرف‌کنندگان خانگی ۳۸
- شکل ۸-۲. یک نمونه‌ی ساده از هاب انرژی ۳۹
- شکل ۹-۲. سیستم نمونه با هاب‌های به هم پیوسته ۴۱
- شکل ۱۰-۲. ساختار پیشنهادی سیستم قدرت با حضور هاب‌های انرژی در شبکه ۴۴
- شکل ۱-۳. ساختار مطالعاتی مدیریت انرژی ریزشبکه با حضور خودروهای الکتریکی ۴۹
- شکل ۲-۳. الگوی بار مصرفی در سیستم مورد مطالعه ۵۴
- شکل ۳-۳. تعداد خودروهای متصل به شبکه در هر ساعت ۵۵
- شکل ۴-۳. الگوی بهینه‌ی شارژ خودروها در طول شبانه‌روز ۵۶
- شکل ۵-۳. الگوی بهینه‌ی تولید انرژی توسط خودروها در طول شبانه‌روز ۵۶
- شکل ۶-۳. تبادل انرژی بین مجتمع مصرف‌کننده و شبکه ۵۷
- شکل ۷-۳. مفهوم برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای ۶۴
- شکل ۸-۳. الگوی بار مصرفی ریزشبکه ۶۷
- شکل ۹-۳. مقدار تولید فتوولتاییک بر اساس تابش پیش‌بینی شده ۷۰
- شکل ۱۰-۳. وضعیت در مدار قرار گرفتن منابع تولید ۷۲
- شکل ۱۱-۳. توان شارژ/دشارژ خودروها در دوره برنامه‌ریزی ۷۳
- شکل ۱۲-۳. میزان تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی ۷۳
- شکل ۱۳-۳. مقدار مورد انتظار تولید در روز آینده توسط DG ها ۷۴
- شکل ۱-۴. یک نمونه هاب انرژی متصل به شبکه‌های الکتریکی، حرارتی و گاز طبیعی ۸۰
- شکل ۲-۴. مبدل انرژی تک‌ورودی و تک‌خروجی ۸۱
- شکل ۳-۴. مبدل با چند ورودی و چند خروجی ۸۲
- شکل ۴-۴. توزیع انرژی بین چندین مبدل ۸۳
- شکل ۵-۴. مدل تجهیز ذخیره‌کننده ۸۳
- شکل ۶-۴. تجهیز ذخیره‌کننده درون هاب ۸۴
- شکل ۷-۴. یک نمونه هاب انرژی ۸۸
- شکل ۸-۴. فرایند تصمیم‌گیری با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای ۹۶
- شکل ۹-۴. سیستم مورد مطالعه در برنامه‌ریزی تصادفی انرژی ۹۹
- شکل ۱۰-۴. بار الکتریکی، حرارتی و تولید فتوولتاییک پیش‌بینی شده ۱۰۰

- شکل ۴-۱۱. مقدار بهینه‌ی تقاضای الکتریسیته برای هاب انرژی ۱۰۳
- شکل ۴-۱۲. مقدار برنامه‌ریزی شده‌ی توان شارژ/دشارژ مجموعه باتری ۱۰۴
- شکل ۴-۱۳. اختلاف بین مقدار واقعی و مقدار پیش‌بینی شده ۱۰۵
- شکل ۴-۱۴. مقدار برنامه‌ریزی شده‌ی الف) نیاز گاز طبیعی ب) ضرایب توزیع ۱۰۵
- شکل ۴-۱۵. مقدار برنامه‌ریزی شده‌ی تبادل انرژی الکتریکی با شبکه ۱۰۷
- شکل ۴-۱۶. مقدار برنامه‌ریزی شده‌ی تقاضای گاز طبیعی ۱۰۹
- شکل ۴-۱۷. مقدار برنامه‌ریزی شده‌ی توان شارژ و دشارژ مجموعه باتری ۱۰۹
- شکل ۵-۱. شماتیک عملکرد شبیه‌سازی مونت کارلو ۱۱۷
- شکل ۵-۲. فلوچارت مرتبط با ارزیابی‌های انجام شده با روش شبیه‌سازی مونت کارلو ۱۲۰
- شکل ۵-۳. بارهای الکتریکی و حرارتی ریزشبکه ۱۲۲
- شکل ۵-۴. قیمت‌های برق، گاز طبیعی و حرارت در یک روز نمونه ۱۲۲
- شکل ۵-۵. تعرفه‌ی برق برای شبکه‌ی توزیع ۱۲۳
- شکل ۵-۶. تعداد خودروهای پارک شده در پارکینگ هوشمند ۱۲۳
- شکل ۵-۷. میزان تبادل انرژی الکتریکی برنامه‌ریزی شده ۱۲۵
- شکل ۵-۸. میزان توان مورد نیاز پارکینگ ۱۲۵
- شکل ۵-۹. تابع چگالی احتمال سود بهره‌بردار ریزشبکه تحت شرایط مختلف عدم قطعیت ۱۲۶
- شکل ۵-۱۰. تابع چگالی احتمال سود برای عدم قطعیت ۳۰٪ بدون حضور خودروهای الکتریکی ۱۲۷
- شکل ۵-۱۱. تابع چگالی احتمال سود برای عدم قطعیت ۳۰٪ با حضور خودروهای الکتریکی ۱۲۸
- شکل ۵-۱۲. توابع قابلیت اطمینان برای تمام سیستم‌ها تحت شرایط عدم قطعیت ۳۰ درصدی ۱۲۹
- شکل ۵-۱۳. سود مورد انتظار تحت شرایط مختلف عدم قطعیت ۱۳۰
- شکل ۵-۱۴. نمودارهای ضریب تغییر برای سطوح مختلف عدم قطعیت ۱۳۰
- شکل ۵-۱۵. مقایسه‌ی میان نمودارهای ضریب تغییر در دو سناریوی مختلف ۱۳۲

فصل اول: مقدمه

استمرار و پایداری تامین انرژی همواره از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی کشورهای مختلف بوده است. طی سالیان اخیر، استفاده از سیستم‌های تولید پراکنده (¹DG) به عنوان یکی از راهکارهای پاسخگویی به این مساله مطرح شده است. این امر سبب شده است تا منابع تولید پراکنده با فناوری‌های مختلف به شبکه‌های توزیع اضافه شوند. برخی از این مولدها بر پایه‌ی سوخت‌های فسیلی مانند گاز طبیعی کار می‌کنند و همچنین گروهی دیگر از این فناوری‌ها مانند فتوولتائیک، از منابع تجدیدپذیر بهره می‌گیرند. ورود این قبیل منابع موجب شده است تا سیستم قدرت دستخوش تغییراتی شود و مفهوم ریزشبکه‌ها² نیز مطرح شوند. ریزشبکه‌ها نمونه‌ی مدرن و کوچک یک سیستم قدرت متمرکز می‌باشند که از منابع تولید، ذخیره‌کننده‌ها و بارها تشکیل می‌شوند. ریزشبکه‌ها می‌توانند به شبکه‌ی اصلی متصل باشند و یا این که به صورت مستقل بهره‌برداری شوند. در این قبیل سیستم‌ها هر ترکیبی از فناوری‌های تولید و ذخیره ممکن است مورد استفاده قرار بگیرد.

۱-۱ اهمیت تحقیق

مطرح شدن مفاهیمی مانند ریزشبکه و هوشمندسازی شبکه‌های انرژی موجب شده است تا منابع تولید پراکنده و ذخیره‌کننده‌ها با سرعت قابل توجهی به سیستم قدرت اضافه شوند. همچنین پیش‌بینی شده است که در آینده‌ای نزدیک، خودروهای الکتریکی³ مبتنی بر باتری سهم زیادی از بار شبکه را به خود اختصاص دهند [۱]. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA⁴)، تعداد کل خودروهای الکتریکی در دنیا در پایان سال ۲۰۱۶ به مرز ۲ میلیون رسید [۲].

¹ Distributed generation

² Microgrid

³ Electric vehicle

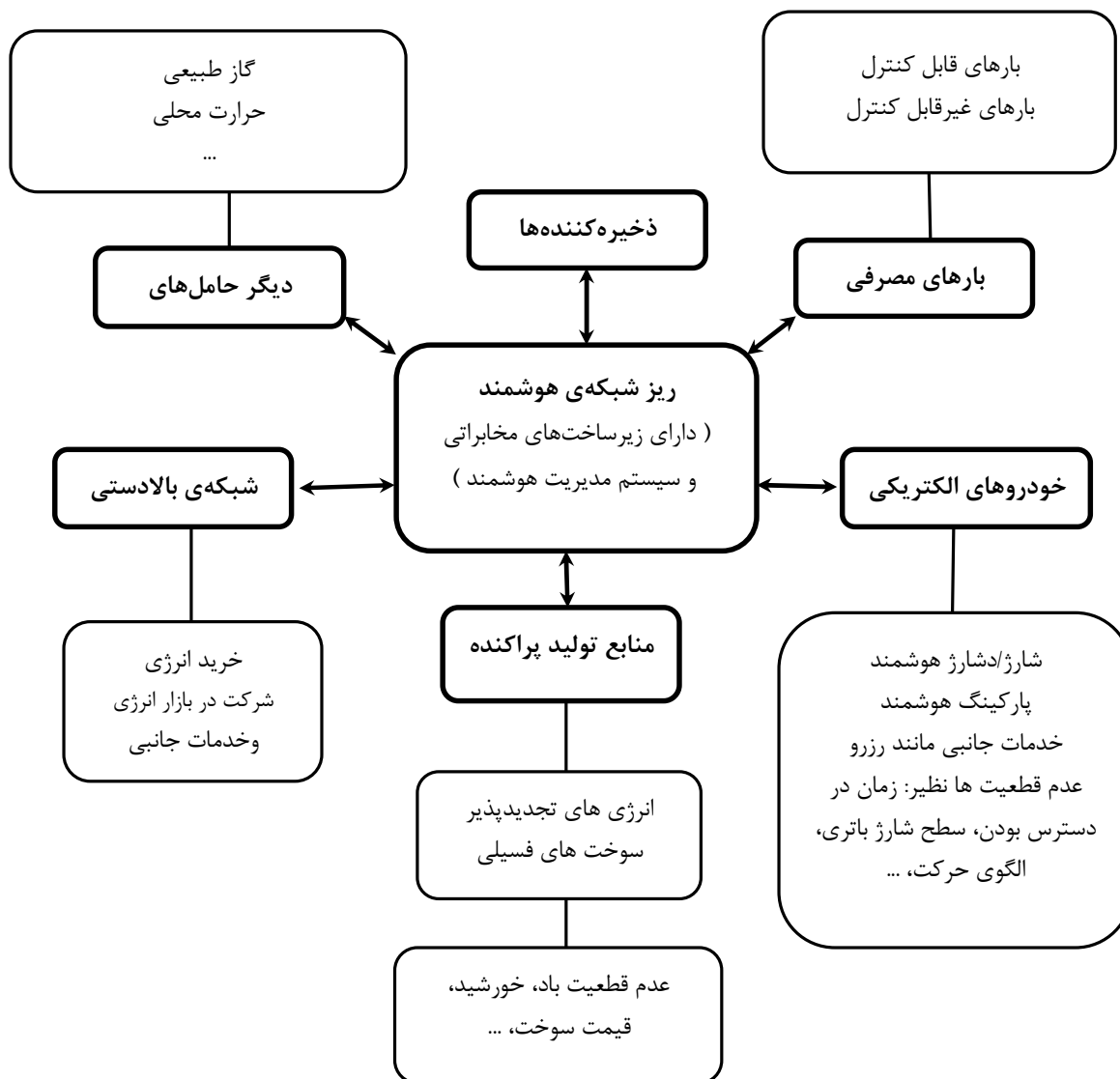
⁴ International energy agency

با بکارگیری فناوری‌های مختلف تولید و حضور بارهایی مانند خودروهای الکتریکی در ریزشبکه‌ها، بهره‌برداری از این سیستم‌ها می‌تواند با چالش‌هایی همراه باشد. البته وجود زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته (AMI^۱) در شبکه‌های هوشمند امکان تبادل اطلاعات را به صورت دوطرفه ممکن می‌سازد و این امر می‌تواند مدیریت انرژی را در این قبیل سیستم‌ها تسهیل نماید. مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی یکی از موضوعات مهمی است که همواره در سیستم‌های انرژی مطرح بوده است. این رساله نیز مساله‌ی مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ی هوشمند مورد مطالعه قرار داده است. مساله‌ی مدیریت انرژی در حالت کلی به برنامه‌ریزی و بهره‌برداری واحدهای تولید و مصرف انرژی می‌پردازد و این کار به گونه‌ای صورت می‌گیرد تا یک سری اهداف از جمله اهداف اقتصادی برآورده شوند. همچنین وجود عدم قطعیت‌هایی مانند پیش‌بینی تولید منابع تجدیدپذیر و بار مصرفی می‌تواند مدیریت انرژی را تحت تاثیر قرار دهد که در این رساله لحاظ شده است. برخی از مواردی که در ارتباط با مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ی هوشمند مطرح هستند را در شکل ۱-۱ می‌توان مشاهده نمود.

۲-۱ اهداف تحقیق

این رساله بر روی بهره‌برداری از ریزشبکه‌ی هوشمند متمرکز شده است و همچنین برنامه‌ریزی خودروهای الکتریکی را نیز در کنار منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازها مورد بررسی قرار داده است. با توجه به ماهیت مساله و وجود عدم قطعیت‌هایی همانند تولید منابع تجدیدپذیر، بار و قیمت انرژی، از روش‌های احتمالی برای برنامه‌ریزی انرژی استفاده شده است.

^۱ Advanced metering infrastructure



شکل ۱-۱. بخش‌های مرتبط با مدیریت انرژی در ریزشبکه

برای رسیدن به این اهداف، مراحل تکمیل مطالب ارائه شده در این رساله به شرح زیر می‌باشد:

الف- مدل ریاضی برای مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی.

ب- مدل ریاضی برای مدیریت انرژی ریزشبکه با حضور تولید پراکنده، منابع تجدیدپذیر و

خودروهای الکتریکی و در نظر گرفتن عدم قطعیت در تولید.

ج- استفاده از مدل هاب انرژی به عنوان ریزشبکه و مدل‌سازی مدیریت انرژی با در نظر

گرفتن عدم قطعیت بار و تولید.

جدول ۱-۱ این مراحل را بصورت جزئی تر نشان می دهد

جدول ۱-۱. مراحل تکمیل انجام مدیریت انرژی در ریزشبکه

عدم قطعیت	ذخیره کننده		بار مصرفی		تولید پراکنده		بند مورد مطالعه
	حرارتی	الکتریکی (خودروهای الکتریکی)	حرارتی	الکتریکی	تجدیدپذیر	سوخت فسیلی	
-	-	+	-	+	-	-	الف
+	-	+	-	+	+	+	ب
+	+	+	+	+	+	+	ج

۱-۳ نوآوری های تحقیق

به طور کلی نوآوری های موجود در این رساله را می توان به صورت زیر بیان نمود:

- ارائه ی مدل برنامه ریزی تصادفی^۱ انرژی در یک ریزشبکه با وجود منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی تحت شرایط وجود عدم قطعیت بار و تولید و همچنین در نظر گرفتن حامل های متعدد انرژی با استفاده از مفهوم هاب انرژی^۲.
- ارزیابی اثر عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی بر روی بهره برداری از ریزشبکه ی انرژی شامل زیرساخت های الکتریکی و گاز طبیعی و همچنین بررسی نقش خودروهای الکتریکی بر روی تغییرات سود حاصل از بهره برداری ریزشبکه به کمک معیارهای ارزیابی ریسک.
- استفاده از برنامه ریزی ریاضی توسعه یافته (EMP^۳) در حل مسائل برنامه ریزی تصادفی به منظور استفاده از حل کننده های^۴ پیشرفته ی موجود در بازار.

^۱ Stochastic programming

^۲ Energy hub

^۳ Extended mathematical programming

^۴ Solver

۱-۴ ساختار رساله

ساختار مطالب در فصل‌های بعدی رساله به این صورت زیر می‌باشد که:

در فصل دوم، ابتدا مفاهیم مرتبط با شبکه‌های انرژی شامل ریزشبهه و شبکه‌های هوشمند مطالعه می‌شود و همچنین اهمیت خودروهای الکتریکی مورد توجه قرار می‌گیرد. در ادامه نیز به بحث مدیریت انرژی در ریزشبهه‌ها پرداخته می‌شود. در همین راستا، اهمیت مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی بیان شده و سپس مدیریت انرژی در ریزشبهه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین در این فصل برخی از فعالیت‌های انجام شده در طی سالیان اخیر مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

در فصل سوم ابتدا به بیان ریاضی مساله‌ی مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی پرداخته می‌شود. در این بخش تابع هدف و قیود حاکم بر مساله‌ی شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی که در یک ناحیه واقع شده‌اند، بیان می‌شود. در ادامه، مساله‌ی مدیریت انرژی برای یک ریزشبهه شامل خودروهای الکتریکی بیان می‌شود. در این بخش عدم قطعیت تولید نیز مدنظر قرار می‌گیرد و برای مدیریت انرژی از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای^۱ استفاده می‌شود. در انتهای فصل نیز برای بررسی کارایی مدل پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی برای یک سیستم نمونه مورد تحلیل قرار می‌گیرند.

در فصل چهارم از مفهوم هاب انرژی برای برنامه‌ریزی انرژی در یک ریزشبهه با حامل‌های متعدد انرژی استفاده خواهد شد. از آنجا که به احتمال فراوان بهره‌برداری و توسعه‌ی شبکه‌های انرژی در آینده به صورت پیکارچه انجام خواهند شد، به کمک هاب انرژی روابط برنامه‌ریزی برای انواع دیگر حامل‌های انرژی نیز می‌توانند تعمیم داده شوند. در این مطالعه به کمک برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای و در نظر گرفتن تعدادی سناریو، عدم قطعیت بار و منابع تجدیدپذیر لحاظ می‌شوند. همچنین به منظور بررسی کارایی مدل، برنامه‌ریزی پیشنهادی بر روی یک سیستم نمونه اجرا خواهد شد.

^۱ Two-stage stochastic programming

در فصل پنجم نیز به کمک مفهوم هاب انرژی، عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی بر روی بهره برداری از ریزشبکه‌ی انرژی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن سطوح مختلف عدم قطعیت، مدیریت انرژی اجرا شده و اثرات تغییر میزان عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی بر روی سود بهره‌برداری سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این مطالعه همچنین در مورد تأثیرات حضور منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی بر روی بهره‌برداری سیستم بحث خواهد شد.

فصل دوم: ریزش شبکه ها و مدیریت انرژی

۲-۱ مقدمه

همگام با پیشرفت فناوری، مسأله‌ی انرژی به یکی از عوامل بسیار مهم در توسعه‌ی جوامع تبدیل شده است. منابع محدود سوخت‌های فسیلی از جمله فرآورده‌های مهم مورد نیاز انسان‌ها می‌باشند. البته باید توجه داشت که با افزایش بکارگیری منابع تجدیدپذیر می‌توان تا حدودی از تامین انرژی مورد نیاز اطمینان حاصل کرد. در حال حاضر بسیاری از کشورها سیاست کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را در پیش گرفته‌اند که این موضوع می‌تواند اهمیت استفاده از منابع تولید پراکنده و انرژی‌های تجدیدپذیر را بیشتر نمایان سازد ([۳] و [۴]).

با افزایش منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازها در شبکه‌های توزیع و همچنین بهبود سطح تبادل اطلاعات و امکان ارتباط مخابراتی بین بخش‌های مختلف سیستم، امروزه مفهوم ریزشبکه‌های هوشمند بسیار مورد توجه قرار گرفته است. توسعه‌ی این شبکه‌ها موجب شده است تا فناوری‌های تولید و ذخیره با راندمان بالا و دوستدار محیط زیست و همچنین لوازم مصرفی هوشمند در سمت مشترکان، گسترش پیدا کنند. از طرفی نیز پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ای نزدیک، خودروهای برقی تشکیل دهنده‌ی بخش قابل توجهی از بارهای الکتریکی شبکه باشند.

بسیاری از مسائلی که در سیستم‌های سنتی وجود داشته‌اند، در ریزشبکه‌ها نیز مطرح می‌شوند. مدیریت انرژی یکی از مهم‌ترین مسایل سیستم‌های انرژی به شمار می‌رود که برنامه‌ریزی و بهره‌برداری واحدهای تولید و مصرف انرژی را شامل می‌شود. در مدیریت انرژی، معمولاً صرفه‌جویی انرژی، کاهش هزینه‌ها و حفظ محیط زیست مورد هدف هستند به طوری که مشترکان همواره به انرژی مورد نیازشان دسترسی داشته باشند. مدیریت انرژی به مفاهیمی همچون مدیریت سمت مصرف^۱، برنامه‌ریزی منابع^۱ و پاسخگویی بار^۲ نزدیک است. طبق تعریف انجمن مهندسان آلمان

^۱ Demand-side management

(VDI^۳)، مدیریت انرژی عبارتست از همکاری نظام‌مند و پیشرفته‌ی تولید، تبدیل، توزیع و مصرف انرژی به طوری که نیازها تامین گردند و اهداف زیست محیطی و اقتصادی برآورده شوند [۵].

۲-۲ ریز شبکه

در شبکه‌های قدرت امروزی، منابع تولید پراکنده با سرعت زیادی در حال اضافه شدن به سیستم هستند. همانگونه که قبلاً هم اشاره شد، بخشی از آن‌ها بر پایه‌ی سوخت‌های فسیلی مانند گاز طبیعی کار می‌کنند؛ اما فناوری‌هایی مانند فتوولتاییک و توربین‌های بادی نیز وجود دارند که توان تولیدی آن‌ها مبتنی بر منابع تجدیدپذیر می‌باشند.

اخیراً به منظور بهره‌برداری از این فناوری‌ها در سطح شبکه‌ی توزیع انرژی، مفهوم ریزشبکه‌ها مطرح شده و توسعه یافتند. ریزشبکه‌ها سیستم‌هایی هستند که برای تامین بارهای موجود در یک ناحیه، قادر به تولید برق می‌باشند. در این قبیل سیستم‌ها ممکن است هر ترکیبی از فناوری‌های تولید و ذخیره به کار رود. استفاده از سیستم انرژی به صورت ترکیبی می‌تواند فواید زیادی را به همراه داشته باشد که از جمله می‌توان به بهبود قابلیت اطمینان، کاهش انتشار گازهای آلاینده، افزایش راندمان انرژی و کاهش هزینه‌ها اشاره نمود [۶].

بر اساس مطالب فوق می‌توان گفت که ریزشبکه‌ها نمونه‌ی مدرن و کوچک یک سیستم قدرت متمرکز هستند که شامل منابع تولید، ذخیره‌کننده‌ها و بارها بوده و در حالت عادی می‌توانند به صورت متصل به شبکه‌ی اصلی^۴ بهره‌برداری گردند. همچنین این امکان وجود دارد تا نقطه‌ی اتصال مشترک^۵ با شبکه‌ی بالادستی قطع شود و ریزشبکه به صورت مستقل کار کند [۷]. منابع تولید و بارها در ریزشبکه‌ها معمولاً در سطح ولتاژ پایین کار می‌کنند. همچنین تولید انرژی در این نوع

^۱ Resource scheduling

^۲ Demand response

^۳ Verein deutscher ingenieure

^۴ Main grid

^۵ Point of common coupling

شبکه‌ها می‌تواند از طریق چندین منبع مختلف شامل منابع تجدیدپذیر و منابع سوخت فسیلی صورت پذیرد [۸]. منابع متنوع تولید و قابلیت بهره‌برداری به صورت مستقل از شبکه‌ی اصلی، یک سیستم قدرت کوچک با قابلیت اطمینان بالا را به وجود می‌آورد. همچنین گرمای ایجاد شده از منابع تولید، مانند میکروتوربین‌ها، می‌تواند در فرایند حرارتی و یا گرمایش محیطی مورد استفاده قرار گیرد و تامین نیازهای حرارتی را ممکن نماید.

ریزشبکه‌ها می‌توانند نقش مهمی را در توسعه‌ی شبکه‌ی قدرت یک کشور ایفا کنند. به عنوان نمونه برای افزایش قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری شبکه، سازمان انرژی امریکا یک مجموعه کاملی از فعالیت‌هایی را که بر روی توسعه و بکارگیری ریزشبکه‌ها متمرکز است، در برنامه‌های خود قرار داده است [۹]. کارایی ریزشبکه‌ها از طریق بکارگیری روزافزون منابع تجدیدپذیر و همچنین دیگر منابع تولید پراکنده مانند مولدهای همزمان برق و حرارت (¹CHP)، ذخیره‌سازها، و به وجود آوردن قابلیت پاسخگویی بار، پشتیبانی می‌شود. همچنین استفاده از منابع انرژی به صورت محلی برای تامین بارهای ناحیه، کاهش تلفات در شبکه‌های انتقال و توزیع را به همراه دارد که این موضوع موجب افزایش راندمان در تحویل انرژی به مصرف‌کننده می‌گردد [۱۰].

امروزه گروه‌های پژوهشی زیادی در سراسر جهان در حال توسعه‌ی مفهوم ریزشبکه به عنوان راهکاری برای افزودن منابع تولید پراکنده در شبکه‌ی ولتاژ پایین هستند. در شبکه‌ی فشار ضعیف سنتی، سطح مجاز کنترل محلی منابع بسیار پایین است و فقط تحت یک سری شرایط خاص (مثلاً خاموشی پس از جزیره‌ای شدن شبکه) امکان کار کردن به صورت مستقل از شبکه را دارند. در مقابل، ریزشبکه‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که اغلب متصل به شبکه هستند، اما به دلایل مختلف (کاهش هزینه، بهبود قابلیت اطمینان و...) می‌تواند به صورت جدا از شبکه کار کنند.

¹ Combined heat and power

۲-۳ شبکه‌ی هوشمند^۱

طی یک دهه‌ی گذشته همواره از مقررات زدایی^۲ به عنوان ابزاری برای پیشرفت و بروز رسانی شبکه‌های الکتریکی یاد می‌شده است. با مقررات‌زدایی از صنعت برق، مالکیت و کنترل بخش‌های تولید، انتقال و توزیع از انحصار شرکت‌های بزرگ خارج می‌شود به طوری که مدیریت بخش‌های مذکور را شرکت‌های جداگانه بر عهده خواهند گرفت. هر یک از این شرکت‌ها نیز تحت تاثیر بازارهای آزاد برای یافتن شیوه‌های کارآمدتر، قابل اعتمادتر و اقتصادی‌تر تلاش خواهند کرد.

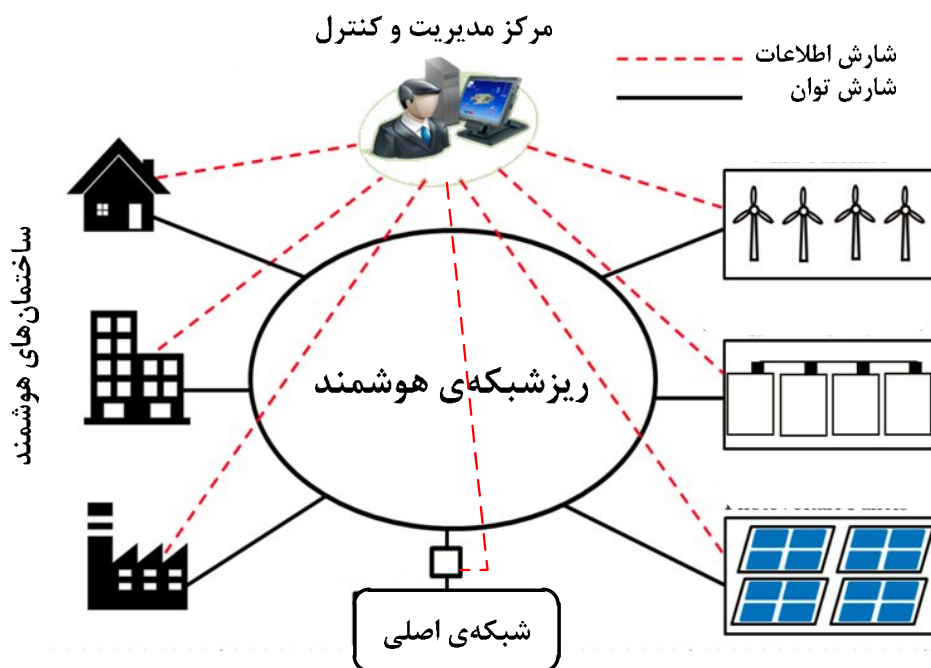
امروزه هوشمندسازی شبکه یکی از پرتعدادترین ایده‌هایی است که برای مدرن‌سازی شبکه‌های الکتریکی آینده مطرح می‌گردد. طی چندین سال گذشته، در ایالات متحده طرح‌های مختلف با بودجه‌های چندین میلیارد دلاری برای پروژه‌هایی مانند پیاده‌سازی کنترلهای هوشمند، ارتقای زیرساخت شبکه و تولید تجهیزات هوشمند توسط دولت پشتیبانی شدند [۱۱]. تقریباً تمام تعاریفی که از شبکه‌های هوشمند شده است بر روی یک موضوع مشترک هستند که: شبکه‌های هوشمند برای انتقال و توزیع بهینه‌ی برق از طرف تامین‌کنندگان به سمت مصرف‌کنندگان، از فناوری ارتباطات و اطلاعات استفاده می‌کنند. ریزشبکه‌های هوشمند همانند سیستم قدرت بزرگ، انرژی الکتریکی را تولید، توزیع و به سمت مصرف‌کننده هدایت می‌کنند اما تمام مراحل به صورت محلی می‌باشد.

یکی از مزایای مهم شبکه‌ی هوشمند، مدیریت سمت مصرف می‌باشد [۱۲]. ریزشبکه‌های هوشمند یک راه ایده‌آل برای اضافه کردن منابع تجدیدپذیر در سطح عمومی می‌باشند و مشارکت مشترکان را در پروژه‌های سیستم قدرت ممکن می‌سازند [۱۳]. تبادل اطلاعات و انرژی در این سیستم‌ها دوطرفه بوده و از تعداد زیادی منابع تولید غیرقابل توزیع^۳ تشکیل شده‌اند. البته قابل درک

^۱ Smart grid

^۲ Deregulation

^۳ Non-dispatchable resources



شکل ۱-۲. ساختار ریز شبکه‌های هوشمند [۱۴]

است که شبکه‌ی هوشمند یک مفهوم ثابت نیست و تا تکامل فناوری‌های موجود و ورود فناوری‌های جدیدی که در حال توسعه می‌باشند، تکامل این مفهوم نیز ادامه خواهد داشت. شکل ۱-۲ نمای یک ریز شبکه را نشان می‌دهد که به تجهیزات اندازه‌گیر هوشمند و زیرساخت‌های مخابراتی مجهز می‌باشد.

۲-۳-۱ ساختار شبکه‌ی هوشمند

شبکه‌های هوشمند برای دستیابی به اهداف مورد نظر، ترکیبی از فناوری‌های مختلف را به کار می‌گیرند از جمله؛ ارتباط دو طرفه^۱، روش‌های کنترل پیشرفته، تجهیزات سنجش و اندازه‌گیری، و برنامه‌های کاربردی^۲ مربوط به فناوری‌های شبکه هوشمند [۱۱].

ارتباط دو طرفه، نظارت و تعامل با اجزای شبکه هوشمند را در کوتاهترین زمان و یا اصطلاحاً به صورت زمان واقعی^۱ ممکن می‌کند. این نوع ارتباط، توانایی بهره‌بردار را در مدیریت نمودن فعالیت-

^۱ Two-way communication

^۲ Applications of smart grid technology

های شبکه بهبود می بخشد. در یک شبکه‌ی هوشمند، بهره‌بردار بدون نیاز به هیچ‌گونه اطلاع‌رسانی از طرف مشتریان قادر به شناسایی و مدیریت مشکلات شبکه می‌باشد که این قابلیت با وجود ارتباط دو طرفه میسر می‌شود. تحت این شرایط انتظار می‌رود که رفع مشکلات شبکه سریع‌تر و هزینه‌های بهره‌برداری کاهش پیدا کنند.

با وجود ارتباط دو طرفه، روش‌های کنترل پیشرفته امکان مدیریت اجزای مختلف شبکه‌ی هوشمند را به بهره‌بردارها می‌دهند. همچنین این روش‌های کنترلی علاوه بر عیب‌یابی و تعمیر و نگهداری مناسب، جمع‌آوری داده‌ها را نیز به صورت پیشرفته ممکن می‌سازند. به عنوان مثال، بهره‌بردار می‌تواند یک مشکل را به همراه جزئیات شناسایی کند و از راه دور به رفع آن بپردازد، که این کار موجب صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های مرتبط با ارسال خدمه به محل می‌شود.

فناوری‌های سنجش و اندازه‌گیری، مواردی همچون پایداری، سلامت، و کارایی امنیتی شبکه را پشتیبانی می‌کنند. رایج‌ترین این فناوری‌ها، کنترل هوشمند است. یک کنترل هوشمند می‌تواند آمار مصرف را کنترل کند و جزئیات آن را به شرکت خدماتی و مصرف‌کنندگان گزارش دهد. با وجود کنترل هوشمند و زیرساخت پشتیبانی آن، شبکه‌ی هوشمند می‌تواند برای عملکردهای دیگری مانند اطلاع‌رسانی قطع برق و غیر فعال کردن خدمات به صورت از راه دور، مورد استفاده قرار بگیرد.

به منظور ارائه‌ی داده‌های مصرفی مشتریان به صورت زمان واقعی، به برنامه‌های کاربردی نیاز می‌باشد تا آمار مصرف و قیمت‌گذاری در هر لحظه به مشتریان نشان داده شود. برنامه‌های کاربردی به دنبال این هستند که اطلاعات را به شیوه‌ای ساده ارائه دهند تا مصرف‌کننده از میزان مصرف برق و هزینه‌های آن به صورت دقیق و کامل مطلع باشد.

¹ Real-time

۲-۳-۲ دلایل استفاده از شبکه‌های هوشمند

شبکه‌های هوشمند به دنبال اصلاح مشکلات سیستم‌های فعلی و همچنین افزودن قابلیت‌های جدید به آن‌ها می‌باشند. بهبود شاخص‌های اقتصادی، زیست محیطی و قابلیت اطمینان همواره به عنوان عمده‌ترین دلایل بکارگیری شبکه‌های هوشمند یاد شده‌اند. وزارت انرژی ایالات متحده^۱ ارتقای قابلیت اطمینان، سازگاری^۲ با منابع انرژی سنتی و تجدیدپذیر و کاهش انتشار کربن را از مهم‌ترین اهداف شبکه‌ی هوشمند معرفی می‌کند [۱۵].

۲-۳-۳ بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر

در تولید انرژی الکتریکی، عواملی مانند محدودیت منابع فسیلی و نگرانی‌ها در مورد اثرات زیست محیطی باعث حرکت به سمت منابع پاک و تجدید پذیر مانند باد و انرژی خورشیدی شده‌اند. متأسفانه این نوع منابع مشکلات خاص مربوط به خود را دارند که از جمله می‌توان به محلی بودن آن‌ها، احتمال خطا در پیش‌بینی تولید و مساله‌ی پیوستگی تامین انرژی اشاره کرد. به عنوان مثال تولید یک نیروگاه خورشیدی با توجه به منطقه‌ی جغرافیایی آن بسیار متفاوت خواهد بود. همچنین نیروگاه‌های خورشیدی در طول شب و یا هنگام قرار گرفتن در معرض وضعیت آب و هوایی شدید مانند صاعقه و طوفان، قادر به تولید نمی‌باشند و تحت این شرایط برای تامین تقاضا به منابع انرژی جایگزین نیاز خواهد بود. با توجه به این موارد، شاید بتوان گفت که شبکه‌ی الکتریکی سنتی با منابع انرژی تجدیدپذیر به خوبی سازگار نیست.

^۱ The United States Department of Energy (DOE)

^۲ Compatability

۲-۴ نفوذ خودروهای الکتریکی به شبکه

به طور کلی خودروها به سه گروه تقسیم می‌شوند؛ خودروهای سنتی با موتور احتراق داخلی، خودروهای الکتریکی هیبریدی^۱ و خودروهای کاملاً الکتریکی^۲ [۱۶]. بکارگیری باتری‌ها به عنوان منبع خودروهای الکتریکی، به حدود ۱۰۰ سال قبل بر می‌گردد اما با توجه به پیشرفت موتورهای احتراق داخلی هیچ‌گاه تعداد قابل توجهی از آنها تولید نگردید. در سال‌های اخیر قیمت سوخت بالا رفته و نگرانی‌های زیست محیطی افزایش یافته است. از طرفی پیشرفت باتری‌های با راندمان بالا موجب شده تا مجدداً برای بکارگیری خودروهای الکتریکی انگیزه ایجاد گردد. آلودگی هوا و نیاز به کاهش انتشار گازهای آلاینده و افزایش تقاضا برای سوخت‌های فسیلی از دلایل مهم برای تغییر در بخش حمل و نقل به شمار می‌روند. به عنوان نمونه در کشور آمریکا، طبق آخرین آمار در سال ۲۰۱۷ چیزی در حدود ۳۰٪ از کل انرژی مصرفی، در بخش حمل و نقل مصرف شده است [۱۷].

شبکه‌ی قدرت و صنعت حمل و نقل، دو منبع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای بر روی کره‌ی زمین هستند. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA^۳) حدود دو سوم آلاینده‌های منتشر شده در دنیا در سال ۲۰۱۵ توسط صنعت حمل و نقل و صنعت تولید برق بوده است [۲]. به طور نمونه مطالعات نشان می‌دهند که خودروهای عادی در تهران چیزی در حدود ۷۵٪ از کل آلاینده‌ی این کلان شهر را تولید می‌کنند [۱۸]. شرکت کنترل کیفیت هوای تهران معتقد است که این خودروها یکی از بزرگترین منابع انتشار تولید مونوکسیدکربن (۹۰٪) و ذرات معلق در هوا (۵۸٪) می‌باشند.

طی سالیان اخیر، وضعیت هشدار مربوط به اتمام منابع انرژی فسیلی، نگرانی‌هایی را در بخش‌های اقتصادی، زیست محیطی، صنعتی و اجتماعی به وجود آورده است. یک شیوه‌ی غلبه بر این بحران، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر محلی و بکارگیری خودروهای الکتریکی نسل جدید با قابلیت

^۱ Hybrid electric vehicle

^۲ Electric vehicle

^۳ International energy agency

تزریق توان به شبکه (V2G^۱) می‌باشد. بکارگیری انرژی‌های پاک می‌تواند انتشار آلاینده‌های مربوط به شبکه‌ی قدرت، و همچنین خودروهای برقی نسل آینده نیز می‌توانند انتشار آلاینده‌های مربوط به بخش حمل و نقل را کاهش دهند. حتی این تلاش نیز وجود دارد که انرژی مورد نیاز خودروهای الکتریکی مبتنی بر باتری توسط انرژی‌های تجدیدپذیر تامین شود [۱۹].

امروزه وضعیت خودروهای الکتریکی از مرحله‌ی آزمایشی و تشویقی در حال خارج شدن است و بازار فروش آن‌ها نشان از جدی بودن حضور این قبیل خودروها در شبکه می‌باشد. با توجه به آمارهای رسمی فروش خودروهای الکتریکی در دنیا، انتظار می‌رود که خودروهای الکتریکی مبتنی بر باتری در آینده‌ی نه چندان دور، سهم قابل توجهی از بارهای شبکه‌های هوشمند را به خود اختصاص دهند. طبق گزارش IEA تعداد کل خودروهای الکتریکی در دنیا در سال ۲۰۱۶ به حدود ۲ میلیون رسید [۲].

هرچند در کشور ما ممکن است تولید خودروهای الکتریکی چندان مهم نباشد، اما قابل ذکر است که قانون‌گذاران بخش انرژی در بسیاری از کشورها برای پیروی از سیاست کاهش گازهای گلخانه‌ای، اقدام به افزایش این گونه خودروها نموده‌اند. به طور مثال در کشور ایرلند رسیدن به مرز ۱۰ درصدی خودروهای برقی تا سال ۲۰۲۰ مورد نظر است که چیزی در حدود ۲۳۰ هزار خودرو می‌باشد [۲۰]. بدیهی است که شارژ شدن این تعداد خودرو می‌تواند بر روی الگوی بار شبکه در ساعات خاصی تاثیر بگذارد. هدف اصلی خودروهای الکتریکی، بکارگیری آن‌ها در بخش حمل و نقل می‌باشد. البته آمارها نشان می‌دهند که خودروها در طول شبانه‌روز بطور میانگین کمتر از ۱۰٪ زمان را در جاده‌ها هستند که این موضوع سبب می‌شود تا به طور بالقوه در ۹۰٪ از زمان‌های دیگر در دسترس باشند [۲۱]. افزایش تعداد خودروهای الکتریکی دلیلی است تا اقتصادی بودن آن‌ها و تاثیرات آن‌ها روی شبکه‌ی توزیع الکتریکی مورد تحلیل قرار گیرد. هر چند افزایش این نوع خودروها عدم قطعیت

^۱ Vehicle-to-grid

بار را بیشتر می‌کند ([۲۲] و [۲۳])، اما آن‌ها پتانسیل بالایی در افزایش بهره‌وری، کاهش گازهای آلاینده و کاهش وابستگی به حامل‌های انرژی فسیلی دارند.

۲-۵ مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی

خودروهای الکتریکی از مولفه‌های مهم شبکه‌های الکتریکی آینده به شمار می‌روند. گستردگی خودروهای الکتریکی در جهان می‌تواند روشی برای جبران کمبود سوخت‌های فسیلی و کاهش آلاینده‌گی باشد. رسیدن به این اهداف فقط با استفاده‌ی درست و بهینه از این خودروها می‌تواند حاصل شود؛ طوری که به عنوان بار و ذخیره‌ساز انرژی در کنار منابع تولید پراکنده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۴]. همچنین اتصال خودروها به شبکه ممکن است مشکلات فنی را به دنبال داشته باشد که باید به طور مناسب به آن‌ها پاسخ داده شود. از آنجا که خودروهای الکتریکی مصرف قابل توجهی دارند، فراگیر شدن این بارها ممکن است سیستم قدرت را با مشکلات مهمی روبرو کند. برای درک این موضوع کفایت فرض شود که چند درصد از خودروهایی که در یک کشور تردد می‌کنند، با نوع الکتریکی تعویض شوند. اضافه شدن این بار در مدت کوتاه می‌تواند مشکلاتی را برای زیرساخت‌های موجود در تولید، انتقال و توزیع ایجاد کند.

خودروهای الکتریکی از باتری‌ها به عنوان منبع انرژی استفاده می‌کنند. این خودروها هنگامی که به شبکه وصل شوند و قابلیت شارش توان به سمت شبکه ($V2G^1$) وجود داشته باشد، سطح شارژ باتری آن‌ها می‌تواند با توجه به شرایط شبکه و انگیزه‌های اقتصادی کم و زیاد شود. طی سالیان اخیر تعداد زیادی از محققان موضوع مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در مسایلی که به مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی می‌پردازند این چالش مطرح بوده است که با افزایش تعداد خودروهای الکتریکی، بار قابل توجهی به شبکه اضافه خواهد شد. مطالعات نشان

¹ Vehicle-to-grid

می‌دهند که اگر شارژ خودروها بدون برنامه‌ریزی انجام شود، مشکلات مختلفی می‌تواند بوجود آید ([۲۵] و [۲۶]). از مهم‌ترین این مشکلات می‌توان به مواردی همچون افزایش تلفات [۲۷]، افزایش بار شبکه [۲۸]، عدم تعادل بار [۲۹]، افت ولتاژ [۳۰] و کاهش عمر تجهیزات شبکه [۳۱] اشاره نمود. این قبیل مشکلات موجب می‌شوند تا انجام برنامه‌ریزی برای شارژ و دشارژ خودروها از اهمیت خاصی برخوردار باشد. با برنامه‌ریزی صحیح و شارژ کنترل‌شده‌ی خودروها، این پتانسیل وجود خواهد داشت تا برخی از مشکلات شبکه (مانند نیاز به توسعه‌ی شبکه) مرتفع گردند [۳۲]. بعضی از مطالعات مانند مراجع [۳۳] و [۳۴] استراتژی‌های مختلف شارژ کردن باتری خودروهای الکتریکی را مورد بررسی قرار داده‌اند. این استراتژی‌ها شامل شارژ بدون کنترل^۱، کنترل هوشمندانه^۲ (برای بهینه‌سازی یک معیار مانند هزینه) و کنترل با قابلیت V2G می‌باشند.

مدیریت بهینه‌ی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی همواره به صورت یک مساله‌ی بهینه‌سازی مطرح می‌شود که می‌تواند اهداف مختلفی داشته باشد. این مساله معمولاً به صورت مختلط با عدد صحیح^۳ بیان می‌گردد، زیرا برای مشخص نمودن وضعیت شارژ یا دشارژ خودروی متصل به شبکه نیاز به متغیر تصمیم‌گیری باینری می‌باشد. در حالت کلی مساله‌ی برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط با عدد صحیح، به صورت زیر بیان می‌شود [۳۵].

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(x, y) \\ & \text{subject to } g(x, y) = 0 \\ & \quad h(x, y) \leq 0 \end{aligned} \tag{۱-۲}$$

که:

x بردار متغیرهای بهینه‌سازی پیوسته،
 y بردار متغیرهای بهینه‌سازی گسسته،
 $f(\cdot)$ تابع هدف اسکالر،
 $g(\cdot)$ بردار قیود تساوی و
 $h(\cdot)$ بردار قیود نامساوی می‌باشد.

^۱ Simple charging

^۲ Smart charging

^۳ Mixed integer

یکی از معمول‌ترین توابع هدف، حداقل‌سازی هزینه بابت خرید انرژی از شبکه می‌باشد. مراجع بسیاری از جمله [۳۳]، [۳۶] و [۳۷] با هدف حداقل‌سازی هزینه، مدیریت انرژی خودروها را انجام داده‌اند. هر چند معیارهای دیگری مانند حداقل‌سازی میزان آلاینده‌گی [۳۸]، حداقل‌سازی مصرف سوخت فسیلی [۳۹]، حداقل‌سازی تلفات سیستم [۴۰]، حداکثرسازی سود [۴۱] و حداکثرسازی رفاه اجتماعی^۱ [۴۲] نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند.

با توجه به حضور خودروها در شبکه، انرژی دریافتی (تزریقی) خودرو از (به) شبکه در زمان‌های مختلف یکی از مهم‌ترین خروجی‌های برنامه‌ریزی انرژی خواهد بود [۴۳]. انرژی ذخیره شده در باتری خودرو (E) در پایان دوره t به این وابسته است که در پایان دوره قبلی، سطح انرژی باتری^۲ (SOC) چقدر بوده و همچنین در دوره t چه مقدار انرژی (ΔE) توسط باتری دریافت/تزریق شده است.

$$E_t = E_{t-1} \pm \Delta E_t \quad (2-2)$$

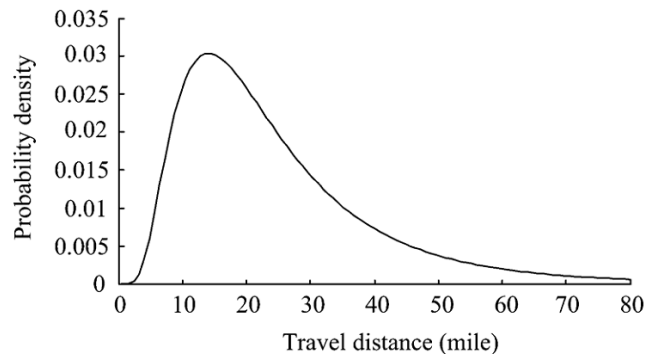
روابط حاکم بر انرژی خودروهای الکتریکی به طور کامل در فصل بعدی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

مرجع [۴۴] مدیریت هوشمند شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی را با هدف حداقل‌سازی انرژی خریداری شده از شبکه، مورد مطالعه قرار داده تا بتواند زمان بهینه‌ی شارژ و دشارژ خودروها را تعیین نماید. معمولاً در مطالعات مدیریت انرژی خودروها، مشخصات فنی یکسانی برای تمامی خودروهای موجود در ناحیه‌ی مورد مطالعه لحاظ می‌گردد و شارژ و دشارژ انرژی خودروها با نرخ ثابتی در نظر گرفته می‌شود. در [۴۵] تلفات باتری نیز در شارژ بهینه‌ی خودروهای برقی لحاظ شده است. بدین منظور باتری به صورت یک مدار معادل مدل‌سازی شده است تا بتوان تلفات را در فرایند شارژ و دشارژ محاسبه نمود. مرجع [۴۶] نیز با ارائه‌ی یک مدل برای بارهای خودرویی، یک روش برای مدیریت انرژی مصرفی خودروهای الکتریکی پیشنهاد داده است. در این مطالعه از یک تابع

^۱ Social welfare

^۲ State of charge (SOC)

چگالی توزیع برای تخمین میزان مسافت طی شده‌ی خودروها استفاده شده است که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲. توزیع احتمال مسافت خودروها در طول شبانه‌روز [۴۶]

تابع چگالی احتمال برای مسافت طی شده‌ی خودرو بر حسب فاصله عبارتست از [۴۶]:

$$g(d; \mu, \sigma) = \frac{1}{d\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(\ln d - \mu)^2 / 2\sigma^2}, \quad d > 0 \quad (3-2)$$

که در این معادله، d فاصله‌ای است که خودرو در طی شبانه‌روز طی می‌کند و μ, σ به ترتیب برابر با میانگین و انحراف معیار از توزیع نرمال می‌باشند. تابع هدفی که در [۴۶] به کار گرفته شده، حداقل‌سازی میزان تغییرات از مقدار میانگین مصرف می‌باشد. این مدیریت به صورت یک مساله‌ی بهینه‌سازی بیان گردیده و پس از بیان قیود حاکم بر مساله، به تحلیل مدل پیشنهادی پرداخته شده است. همچنین برای بررسی صحت مدل، یک سیستم نمونه مورد بررسی قرار گرفته است که در آن چهار سناریوی مختلف برای تعداد خودروهای برقی موجود در شبکه در نظر گرفته شده است. نتایج بیانگر آن است که شارژ بهینه‌ی خودروهای برقی پتانسیل بالایی در بهبود پروفیل بار شبکه دارد.

قابل درک است که شارژ/دشارژ متوالی باتری‌ها موجب کاهش عمر مفید آن‌ها می‌گردد. البته این کاهش عمر به ترکیبات شیمیایی، عوامل استرس حین شارژ (مانند دما) و مشخصه‌های شارژ و دشارژ باتری بستگی دارد. بنابراین خدماتی مانند قابلیت شارش توان از سمت خودرو به شبکه، بر روی کاهش عمر باتری‌ها تاثیرگذار هستند. این موضوع باعث می‌شود هزینه‌ی اضافی به مالکان خودروها تحمیل شود که می‌توان در هنگام برنامه‌ریزی شارژ خودروها، این هزینه را نیز در نظر گرفت. به عنوان

مثال، مرجع [۴۷] یک الگوریتم برای برنامه‌ریزی خودروهای الکتریکی ارائه کرده است که کاهش عمر باتری، چه در هنگام حرکت خودرو و چه در فرایند تزریق توان به شبکه، در تابع هدف پیشنهادی تاثیر داده شده است. البته یک مدل مشخص یا دقیق برای کاهش عمر باتری معرفی نشده و فقط برخی از مشخصه‌های کلی در مستهلک شدن باتری بیان گردیده و هزینه‌ی ناشی از آن‌ها در تابع هدف تاثیر داده شده است. هزینه‌ی سیکل شارژ/دشارژ برای باتری با ظرفیت X کیلووات ساعت به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۴۷]:

$$C^X = \left\lfloor \frac{k}{100} \right\rfloor \frac{X}{E_{\max}} C^B \quad (۴-۲)$$

که k شیب مربوط به تقریب خطی مشخصه‌ی عمر باتری (تابعی از دفعات شارژ/دشارژ)، E_{\max} ظرفیت باتری و C^B هزینه‌ی باتری است. در این مرجع، تابع هدف پیشنهادی از نوع هزینه بوده که متشکل از هزینه‌ی پرداختی بابت مصرف انرژی و هزینه‌ی استهلاک باتری می‌باشد.

۲-۶- بکارگیری روش‌های مختلف در مدیریت انرژی خودروی

الکتریکی

برخی مطالعات، مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی را با روش‌های مختلف پیشنهاد کرده‌اند. بطور نمونه مرجع [۴۸] یک سیستم چندعاملی^۱ برای شارژ خودروهای برقی پیشنهاد داده است. هدف این بوده است که برنامه‌ریزی شارژ خودروهای برقی بر اساس قیمت برق و قیود فنی شبکه محاسبه شوند. به طور مشابه، در [۴۹] نیز کنترل و برنامه‌ریزی شارژ غیرمتمرکز خودروهای الکتریکی به کمک سیستم چندعاملی انجام شده است.

^۱ Multi-agent

همچنین برای برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی شیوه‌های کنترلی مختلفی نیز ارائه شده‌اند. به عنوان نمونه در [۵۰] یک شیوه‌ی کنترلی سلسه‌مراتبی^۱ برای بهره‌گیری از خودروهای برقی در شبکه‌ی توزیع با حضور منابع تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. مرجع [۵۱] هم از روش کنترل فازی برای مدیریت شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی استفاده نموده است. در [۲۵] نیز یک روش کنترل محلی پیشنهاد شده و با روش کنترل متمرکز مقایسه شده است. برای هر دو استراتژی کنترلی یک سری فواید و ضعف‌هایی به عنوان نتیجه حاصل شده که از مهم‌ترین مزیت‌های کنترل محلی، حداقل نیاز به زیرساخت ارتباطاتی و مهم‌ترین ضعف آن نیز عدم ارتباط با بقیه‌ی شبکه بیان شده است. مرجع [۵۲] نیز مدیریت بار در شبکه‌ی هوشمند با حضور خودروهای برقی را به روش کنترل پیش‌بین^۲ انجام داده است. همچنین در [۵۳] یک کنترل هوشمند منطقی-فازی ارائه شده و برای حل مساله از الگوریتم ژنتیک بهره گرفته شده است. مرجع [۵۴] نیز مدیریت انرژی خودروهای برقی را به کمک کنترلر مبتنی بر تئوری بازی‌ها انجام داده است.

به منظور آشنایی بیشتر با فعالیت‌های انجام شده در رابطه با برنامه‌ریزی خودروهای الکتریکی، مرجع [۵۵] پیشنهاد می‌گردد. این مرجع، روش‌های موجود بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی خودروهای الکتریکی را گردآوری نموده است. همچنین در این مطالعه ارزیابی تاثیرات و استراتژی‌های شارژ، اهداف برنامه‌ریزی، روش‌های بهینه‌سازی‌های کلاسیک و هوشمند و مقایسه‌ی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

^۱ Hierarchical control

^۲ Model predictive control

۷-۲ مدیریت انرژی در ریزشبه شامل خودروهای الکتریکی و

منابع تجدیدپذیر

استفاده از منابع تجدیدپذیر در شبکه‌های هوشمند همواره با چالش عدم قطعیت همراه می‌باشد. با وجود این که روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی این منابع (باد و خورشید) وجود دارند، اما هیچ تضمینی وجود ندارد تا مقدار پیش‌بینی شده‌ی تولید منابع تجدیدپذیر دقیقاً با توان تولیدی آن‌ها در زمان واقعی برابر باشد. بنابراین همواره خطای پیش‌بینی وجود خواهد داشت. با توجه به وجود خطای پیش‌بینی، نتایج برنامه‌ریزی روز آینده ممکن است تمام قیود سیستم را در زمان واقعی برآورده نکند و در برخی مواقع نیاز به توزیع مجدد^۱ را به وجود می‌آورد. به همین دلیل در سیستم‌های توزیع با منابع تجدیدپذیر که تغییرات تولید زیادی دارند، برنامه‌ریزی زمان واقعی ضروری به نظر می‌رسد.

با افزایش منابع تولید تجدیدپذیر، بهره‌برداری و همچنین توسعه‌ی سیستم با چالش‌های قابل توجهی در رابطه با قابلیت اطمینان و عدم قطعیت مواجه هستند [۵۶]. به عنوان یک راهکار، استفاده از ذخیره‌کننده‌های انرژی می‌تواند تغییرات انرژی‌های تجدیدپذیر را جبران کند [۵۷].

به منظور غلبه بر عدم تعادل میان تولید منابع تجدیدپذیر و بار مصرفی (که ناشی از تغییرات احتمالی منابع تجدیدپذیر می‌باشد) می‌توان از خودروهای الکتریکی استفاده نمود که این یکی از قابلیت‌های اصلی و مهم شبکه‌های هوشمند می‌باشد. به عنوان نمونه سیستم قدرت کشور دانمارک دارای ظرفیت توربین بادی قابل توجهی می‌باشد و تولید حاصل از آن‌ها دارای تغییرات زیادی است. در سیستم قدرت جنوب دانمارک بالغ بر ۲۷٪ توان تولیدی توسط توربین‌های بادی صورت می‌پذیرد. این امر باعث شده تا مرجع [۵۸] اضافه شدن خودروهای الکتریکی در چنین شبکه‌ای را مورد بررسی قرار داده و برای کاهش هزینه‌ی مالکان خودروها، استراتژی‌های بهینه‌ی شارژ خودروهای الکتریکی را مورد بررسی قرار دهد.

^۱ Redispatch

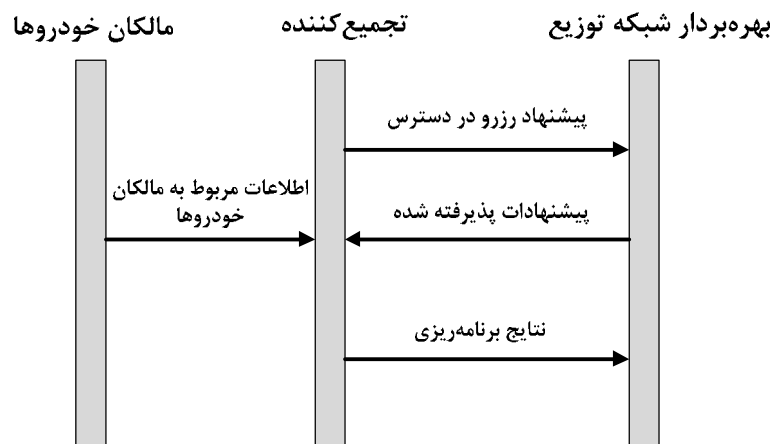
توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، موجب می‌شود حفظ تعادل تولید و مصرف مشکل‌تر شده و همچنین برنامه‌ریزی رزرو نسبت به قبل پیچیده‌تر گردد. بنابراین برای جبران این تغییرات توان، به منابع تولید قابل توزیع نیاز خواهد بود تا پروفیل بار به خوبی دنبال شود. بهره‌بردار شبکه می‌تواند برای اتخاذ تصمیمات اصلاحی در زمان بهره‌برداری، برخی ظرفیت‌های رزرو را در برنامه‌ریزی روز آینده تعیین کند. لذا به کمک فناوری‌های پیشرفته‌ی نظارت و کنترل شبکه‌های توزیع، امکان استفاده از خودروهای الکتریکی در خدمات رزرو نیز میسر می‌گردد.

پیشرفت زیرساخت‌ها، منابع تولید پراکنده و پاسخگویی بار، افزایش پیچیدگی سیستم توزیع را به دنبال داشته است که موجب شده تا مونی‌تورینگ، کنترل و بهره‌برداری شبکه‌ی توزیع برای بهره‌بردار (DSO^۱) دشوارتر شوند. به منظور غلبه بر این پیچیدگی‌ها، مرجع [۵۹] شیوه‌ی جدیدی را برای بهره‌برداری سیستم توزیع ارائه کرده است. این روش نیاز به معرفی تجمیع‌کننده^۲ دارد که به عنوان یک واسطه میان مصرف‌کنندگان و بهره‌بردار شبکه عمل می‌نماید. در روش پیشنهادی، برنامه‌ریزی انرژی و رزرو توسط بهره‌بردار و تجمیع‌کننده بطور همزمان انجام شده است. همچنین خودروهای الکتریکی نیز به عنوان بارهای پاسخگو لحاظ شده‌اند که می‌توانند از طریق ایجاد رزرو برای سیستم، در برنامه‌های خدمات جانبی^۳ شرکت کنند. همانگونه که قبلاً هم اشاره شد، برای مونی‌تورینگ و کنترل برنامه‌ی شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی، به زیرساخت‌های مخابراتی دوطرفه نیاز است. مالکان خودروهای برقی برای شرکت در برنامه‌ریزی انرژی و رزرو می‌بایستی یک سری اطلاعات نظیر؛ زمان رسیدن به پارکینگ، زمان خروج، ظرفیت باتری، سطح شارژ باتری در هنگام ورود و سطح شارژ دلخواه هنگام خروج را اعلام نمایند. بابت این قبیل سرویس‌ها، بهره‌بردار پاداش‌های مالی را برای تجمیع‌کننده در نظر می‌گیرد. هر تجمیع‌کننده از طریق بهینه نمودن برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها، به دنبال حداقل‌سازی هزینه‌ی بهره‌برداری‌اش است. شکل ۲-۳ تبادل اطلاعات میان مالکان

^۱ Distribution system operator

^۲ Aggregator

^۳ Ancillary service market



شکل ۲-۳. تبادل اطلاعات میان مالکان خودروها، تجمیع کننده و بهره‌بردار [۵۹]

خودروها، تجمیع کننده و بهره‌بردار را نشان می‌دهد. در ناحیه‌ی مربوط به هر تجمیع کننده، هزینه‌ی بهره‌برداری شامل هزینه‌ی انرژی خریداری شده از شبکه‌ی اصلی، هزینه‌ی دشارژ انرژی و هزینه‌ی تامین رزرو می‌باشد.

در مرجع [۵۹] کارآیی روش با شبیه‌سازی بر روی یک شبکه‌ی نمونه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج شبیه‌سازی نشان داده‌اند که برنامه‌ریزی هماهنگ خودروهای الکتریکی و مولدهای تجدیدپذیر می‌تواند تأثیرات منفی مربوط به عدم قطعیت انرژی‌های تجدیدپذیر را کاهش دهد. البته لازم به ذکر است که سطح شارژ باتری خودروها در هنگام ورود به پارکینگ یکی از پارامترهایی است که دارای عدم قطعیت می‌باشد. مراجعی مانند [۵۰]، سطح شارژ اولیه‌ی خودروها را توسط تابع چگالی احتمال بدست آورده‌اند.

به طور مشابه در [۶۰] به منظور غلبه بر عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی تولید و ذخیره صورت گرفته که در آن از تابع چند هدفه^۱ که دارای دو بخش تلفات و رزرو می‌باشد، استفاده شده است. این تابع، به صورت همزمان دنبال حداقل‌سازی تلفات و بکارگیری منابع رزرو می‌باشد. در مرجع [۵۸] نیز از تجمیع کننده‌های خودروهای الکتریکی به عنوان یک پشتیبان برای توان راکتیو در

^۱ Multi-objective

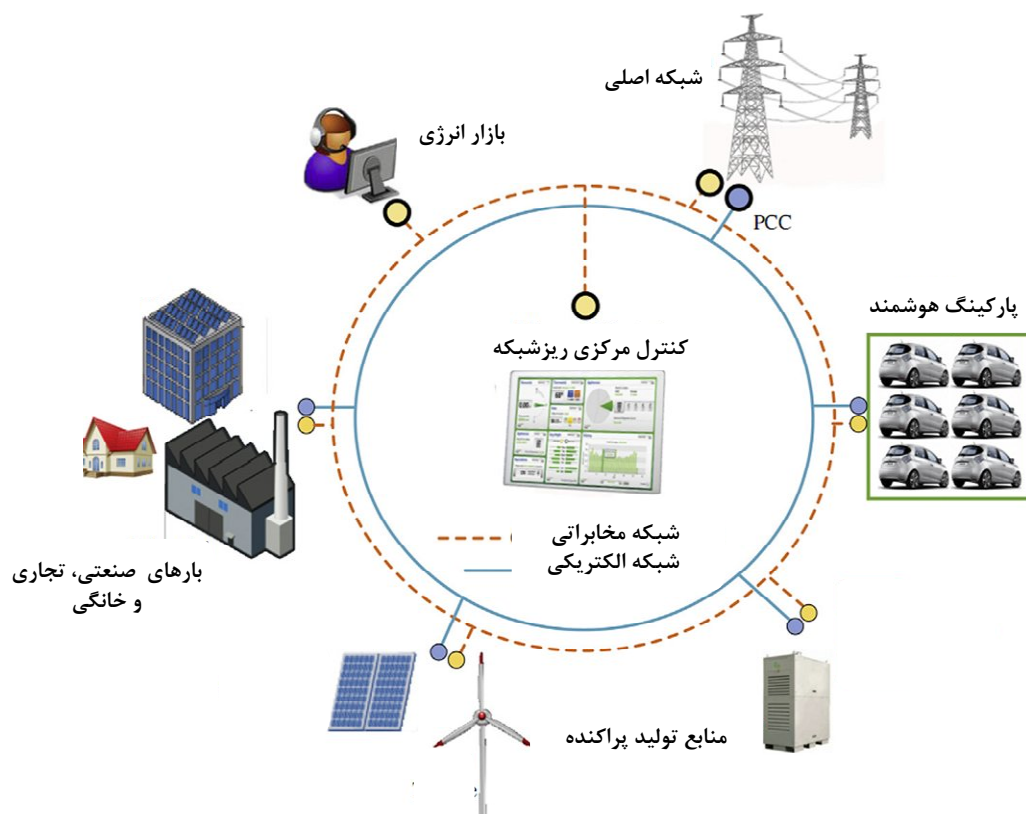
شبکه‌ی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که به کمک خودروها، اضافه ولتاژ و افت ولتاژ باس‌های سیستم می‌تواند مرتفع گردد.

مرجع [۳۳] تاثیرات روش‌های شارژ خودروهای الکتریکی را بر روی پیک بار شبکه و افت ولتاژ بررسی نموده است. این مقاله از روش‌های مبتنی بر سناریو برای در نظر گرفتن عدم قطعیت استفاده نموده است. مرجع [۶۱] نیز یک مدل تصادفی مبتنی بر سناریو برای برنامه‌ریزی انرژی و رزرو در ریزشبکه پیشنهاد کرده است که بهره‌بردار ریزشبکه می‌تواند انرژی را از مولدها و همچنین منابع مربوط به مشترکان خریداری نماید. در این مطالعه فرض شده است که بهره‌بردار، انرژی را با قیمت زمان واقعی به مصرف‌کنندگان می‌فروشد. هدف از این مطالعه، برنامه‌ریزی بهینه‌ی انرژی در ریزشبکه بوده است؛ بگونه‌ای که سود مورد انتظار بهره‌بردار نیز حداکثر گردد.

در مرجع [۲۶] بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ی هوشمند با وجود پاسخگویی بار مورد بررسی قرار گرفته است. ریزشبکه‌ی مورد مطالعه شامل منابع تجدیدپذیر و همچنین خودروهای الکتریکی بوده است که عدم قطعیت‌های مربوط به این عناصر در نظر گرفته شده و برنامه‌ریزی مناسب برای شارژ/دشارژ خودروها پیشنهاد شده است. همچنین در [۶۲] یک مدل برای برنامه‌ریزی منابع و مدیریت هوشمند بارها ارائه شده است که در آن شارژ هوشمند خودروها، پاسخگویی بار و بهره‌برداری از باتری‌های ذخیره‌ساز برای یک ریزشبکه‌ی مستقل لحاظ شده‌اند. این مرجع با در نظر گرفتن چندین سیستم مختلف، رفتار ریزشبکه و نقش مدیریت انرژی را تحت شرایطی که بار افزایش می‌یابد، مورد بررسی قرار داده است. مدل پیشنهادی چندین تابع هدف مختلف را از دیدگاه بهره‌بردار و مالکان خودروها و باتری‌ها در نظر گرفته است. نتایج این مطالعه نشان داده است که ترکیب پاسخگویی بار و باتری‌های ذخیره‌ساز، سیستم را در برابر افزایش بار منعطف‌تر و مقاوم‌تر می‌سازد.

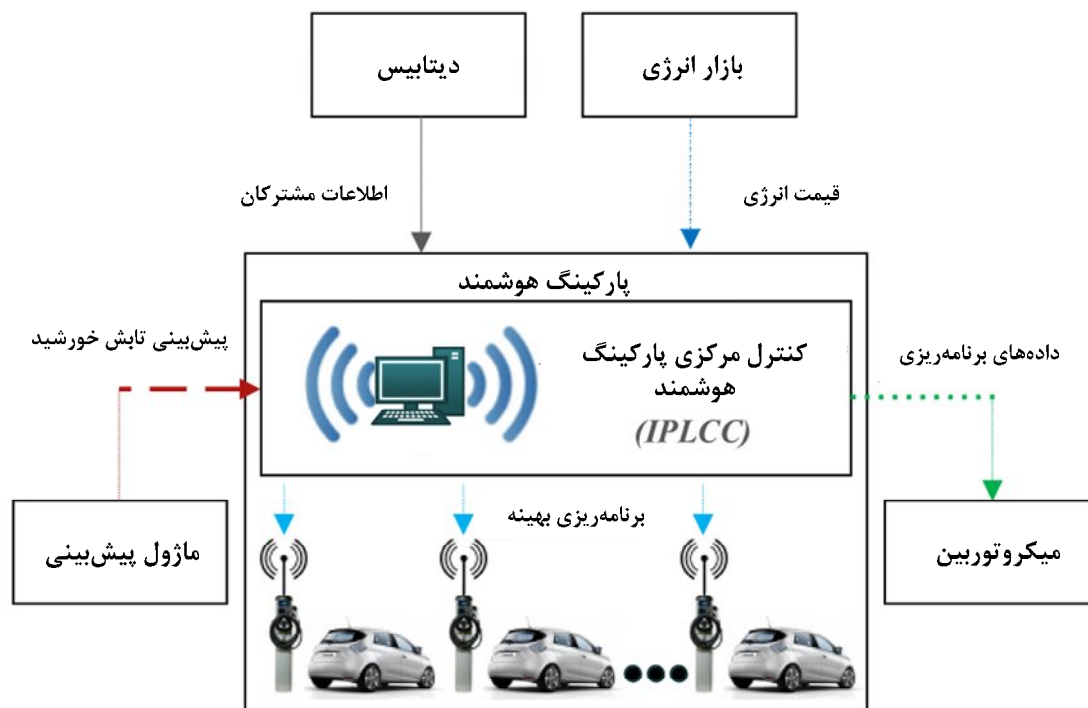
۲-۷-۱ پارکینگ‌های هوشمند^۱

پارکینگ هوشمند در مقایسه با پارکینگ‌های سنتی، قابلیت‌های جدیدی را برای مالکان خودروهای الکتریکی و شبکه به همراه دارد. واژه‌ی هوشمند، اشاره به قابلیت‌های مدیریت انرژی پارکینگ دارد که شامل دریافت و ارسال اتوماتیک اطلاعات به خودروها و اتخاذ تصمیم هوشمندانه با توجه به برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی می‌باشد. این پارکینگ‌ها می‌توانند به سیستم رزرواسیون مجهز باشند که توسط پورتال اینترنتی و یا نرم‌افزارهای تلفن همراه قابل دسترس هستند و مالکان خودروها می‌توانند پارامترهای دلخواهشان مانند سطح شارژ و مدت زمان استفاده از پارکینگ را از روز قبل مشخص کنند. شکل ۲-۴ یک ریزشبکه‌ی هوشمند را نشان می‌دهد که دارای پارکینگ هوشمند بوده و به شبکه‌ی اصلی متصل است.



شکل ۲-۴. تبادل انرژی و اطلاعات در ریزشبکه دارای پارکینگ هوشمند [۶۳]

^۱ Intelligent parking lot



شکل ۲-۵. تبادل اطلاعات در مدل خود-برنامه‌ریزی پارکینگ هوشمند [۶۴]

مرجع [۶۴] از پارکینگ هوشمند به عنوان یک تجمیع‌کننده استفاده کرده که میان خودروها و بهره‌بردار شبکه‌ی توزیع ارتباط برقرار می‌کند. در این مطالعه یک روش برنامه‌ریزی تصادفی برای پارکینگ هوشمند پیشنهاد شده است که مدیریت شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی را بر عهده دارد. پارکینگ هوشمند از مالکان خودروها چندین پارامتر را دریافت می‌کند که به عنوان اطلاعات ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تبادل اطلاعات در مدل مذکور، در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، پارکینگ هوشمند در ابتدا قیمت برق روز آینده را دریافت می‌کند. درخواست‌های مالکان خودروها و اطلاعات پیش‌بینی شده (در اینجا تابش خورشید)، به عنوان اطلاعات ورودی هستند.

همچنین در مدل پیشنهادی مواردی همچون محدودیت‌های سیستم، عدم قطعیت و رزرو چرخان^۱ لحاظ شده‌اند. سپس برنامه‌ریزی تولید و رزرو به همراه برنامه‌ی شارژ/دشارژ خودروها تعیین می‌شود و در نهایت به سیستم شارژر خودروها فرستاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که مدیریت انرژی

^۱ Spinning reserve

پارکینگ‌های یاد شده، اهداف فنی و اقتصادی را برآورده می‌کند. همچنین مالکان خودروها می‌توانند از طریق دشارژ کردن خودروهایشان سود کسب کنند در حالی که هنگام خروج از پارکینگ به سطح شارژ دلخواهشان رسیده‌اند.

مرجع [۶۵] نیز مدلی را برای مدیریت منابع انرژی در یک ریزشبهک پیشنهاد کرده است که در آن پارکینگ‌های هوشمند وجود دارند. در مدل پیشنهادی، منابع انرژی تجدیدپذیر وجود داشته و خطای پیش‌بینی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، تابع هدف از جنس هزینه بوده و از سه بخش مختلف تشکیل شده است که مربوط به: تبادل توان بین ریزشبهک و شبکه‌ی اصلی، تبادل توان بین مولدهای محلی و ریزشبهک، و تبادل توان بین خودروها و ریزشبهک هستند. همچنین در این مطالعه، قید رزرو نیز در نظر گرفته شده است تا در صورت کمبود تولید منابع تجدیدپذیر، ژنراتورهای قابل توزیع و پارکینگ‌های هوشمند بتوانند توازن تولید و مصرف را برقرار کنند. نتایج بخش شبیه‌سازی نشان داده است که برنامه‌ریزی پیشنهادی مربوط به منابع انرژی می‌تواند اهداف پارکینگ هوشمند را برآورده کند.

به طور مشابه مرجع [۶۶] یک الگوریتم مدیریت انرژی زمان واقعی برای پارکینگ‌های متصل به شبکه پیشنهاد داده است. این پارکینگ‌ها شامل خودروهای برقی با باتری‌های مختلف و همچنین دارای منابع تولید تجدیدپذیر می‌باشند. در این مرجع، عدم قطعیت‌هایی مانند زمان ورود و خروج خودروها، توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و انرژی قابل دسترس باتری‌ها در زمان ورود به پارکینگ لحاظ شده است. هدف از مدیریت انرژی، کاهش هزینه‌ی روزانه‌ی انرژی بابت شارژ خودروها، کاهش تاثیرات ایستگاه‌های شارژ بر روی شبکه‌ی اصلی و کاهش پیک بار بوده است.

۲-۷-۲ وارد مدار کردن منابع تولید

در شبکه‌ی هوشمندی که دارای منابع تجدیدپذیر است، خودروهای الکتریکی می‌توانند به عنوان بار، منبع انرژی (نیروگاه پرتابل) و ذخیره‌ساز استفاده شوند. به دلیل وجود عدم قطعیت در

اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه، برای مدیریت و در مدار قرار گرفتن مولدهای شبکه نیاز خواهد بود تا از پیش‌بینی بار استفاده گردد؛ هرچند که بار واقعی با مقدار پیش‌بینی شده متفاوت خواهد بود. بنابراین با توجه به شارژ/ دشارژ هوشمند، وارد کردن واحدهای تولیدی به مدار^۱ در حضور خودروهای الکتریکی تحت شرایط عدم قطعیت در شبکه‌ی هوشمند، بسیار پیچیده خواهد بود. در مساله‌ی ورود واحدهای تولیدی به مدار، برنامه‌ریزی‌ها بر اساس بار پیش‌بینی شده انجام می‌شود و معمولاً بار واقعی، متفاوت از مقدار پیش‌بینی شده است. با حضور خودروهای الکتریکی، عدم قطعیت مربوط به کنترل‌پذیری شارژ و دشارژ خودروها مساله را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد و معمولاً تعداد خودروهای در دسترس تخمین زده می‌شوند.

در [۶۷] یک مدل MILP^۲ برای وارد کردن واحدها به مدار ارائه شده است. در مدل پیشنهادی تاثیر خودروی الکتریکی به عنوان بار قابل انعطاف بر روی هزینه‌ی تولید مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها برای دو سناریوی کلی انجام شده است؛ الف) زیرساخت کامل با امکان شارژ خودرو در همه جا و ب) زیرساخت متوسط با امکان شارژ خودروها فقط در منزل. سیستم مورد مطالعه فقط شامل منابع قابل توزیع بوده و حداقل‌سازی هزینه‌ی تولید برق به عنوان تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته است. هزینه‌ی تولید طبق رابطه‌ی (۵-۲) شامل هزینه‌ی سوخت و هزینه‌ی راه-اندازی واحد می‌باشد.

$$Cost = \sum_i \sum_j (FCost_{i,j} \cdot TP + SCost_{i,j}) \quad (5-2)$$

در این رابطه، $Cost$ هزینه‌ی کل تولید، $FCost_{i,j}$ هزینه‌ی سوخت ژنراتور i در دوره‌ی j ، TP بازه‌ی زمانی برنامه‌ریزی و $SCost_{i,j}$ هزینه‌ی راه‌اندازی ژنراتور i در دوره‌ی j می‌باشند. هزینه‌ی سوخت به صورت یک تابع درجه دوم از توان تولیدی در نظر گرفته شده که با دو بخش تکه-ای خطی تقریب زده شده است. هزینه‌ی راه‌اندازی نیز تابعی از خاموش بودن واحد می‌باشد. اگر زمان

^۱ Unit commitment

^۲ Mixed integer linear programming

خاموش بودن واحد از یک مقدار مشخص “ t_{Cold} ” بیشتر باشد، راه‌اندازی سرد و در غیر این صورت گرم می‌باشد. همچنین قیود MUT^1 و MDT^2 نیز اعمال شده‌اند. در مدل مذکور، رزرو نیز لحاظ شده و ۱۰ درصد از تقاضا در هر ساعت به عنوان رزرو، ضروری فرض شده است. مرجع [۶۸] نیز وارد کردن DGها را برای روز آینده در ریزش‌بکه مورد بررسی قرار داده است. این مرجع از تابع هدف هزینه و آلاینده‌گی به طور همزمان استفاده کرده و به کمک روش‌های هوشمند آن را حل نموده است. همچنین در این مطالعه، اثر ورود واحدها به مدار بر روی مدیریت تراکم شبکه بررسی شده و نتایج نشان دادند که استراتژی مناسب در ورود واحدها به مدار می‌تواند تراکم شبکه را کاهش دهد.

از سوی دیگر، مرجع [۶۹] به مساله‌ی وارد کردن واحدهای تولیدی به مدار با لحاظ کردن عدم قطعیت باد و خورشید، بار مصرفی و خودروهای الکتریکی پرداخته است. در این مطالعه، تعدادی سناریوی معتبر برای عدم قطعیت منابع باد و خورشید، بار و خودروها لحاظ شده و تحت سناریوهای مختلف، یک الگوریتم برای حداقل‌سازی هزینه و آلاینده‌گی (امید ریاضی آن‌ها) در برنامه‌ریزی ورود واحدها به مدار ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، برای بار مصرفی یک توزیع گسسته‌ی احتمال طبق رابطه‌ی (۶-۲) در نظر گرفته شده است.

$$\delta_D = \{(D^1, \rho_d^1); (D^2, \rho_d^2); \dots; (D^{nd}, \rho_d^{nd})\} \quad (6-2)$$

$$\rho_d^1 + \rho_d^2 + \dots + \rho_d^{nd} = 1$$

که ρ احتمال وقوع سناریو و D مقدار بار می‌باشد. به طور مشابه برای باد، خورشید و خودروهای الکتریکی، سناریوهای دارای عدم قطعیت لحاظ شده‌اند. با ایجاد سناریو برای بار، منابع تجدیدپذیر و خودروهای الکتریکی متصل به شبکه، عدم قطعیت مدل شده و مساله‌ی ورود واحدهای تولیدی به مدار برای مولدهای حرارتی تشکیل شده است. البته خروجی این مدل هیچ برنامه‌ریزی را برای شارژ و دشارژ بهینه‌ی خودروهای الکتریکی ارائه نمی‌کند. برای حل این مساله از الگوریتم هوشمند PSO^3

¹ Minimum up time

² Minimum down time

³ Particle swarm optimization

استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که شبکه‌ی هوشمند پتانسیل آن را دارد تا برای کاهش هزینه و آلاینده‌ی شبکه‌ی قدرت و همچنین شبکه‌ی حمل و نقل، حداکثر استفاده را از منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی داشته باشد.

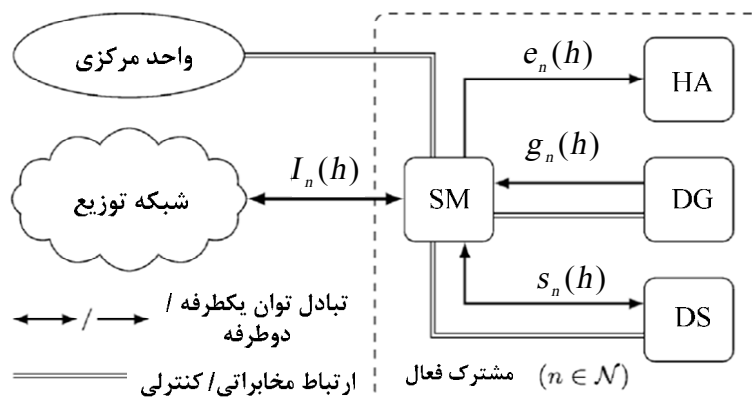
۲-۷-۳ مدیریت انرژی در سمت مصرف و خانه‌ی هوشمند

شبکه‌های هوشمند به دلیل ارائه‌ی سرویس‌های مختلف به مشتری و همچنین تضمین امنیت، کیفیت و راندمان اقتصادی بالا، نقشی اساسی در تغییر کارآیی شبکه‌هایی سنتی دارند. همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد، از شبکه‌های هوشمند انتظار می‌رود تا آلاینده‌ی بخش انرژی را کاهش داده و بکارگیری منابع تجدیدپذیر را تضمین کنند. از آنجا که با وجود منابع تولید تجدیدپذیر توازن بین تولید و مصرف در سطح محلی و ناحیه‌ای پیچیده‌تر می‌شود، در سطح بازار انرژی نیز چنین مسایلی مطرح می‌شوند.

با توجه به این موارد، مفهوم مدیریت سمت مصرف، تولید پراکنده و ذخیره‌ساز انرژی به عنوان تسهیلات اصلی شبکه‌ی هوشمند شناخته می‌شوند. وقتی که منابع تولید پراکنده‌ی قابل توزیع و ذخیره‌سازها در مدیریت سمت تقاضا شرکت داده می‌شوند، این امکان به وجود می‌آید تا چالش‌های ناشی از منابع تجدیدپذیر حداقل گردند. در واقع ترکیب منابع تولید پراکنده، ذخیره‌ساز انرژی و روش‌های مدیریت سمت مصرف، سیستمی با منابع متنوع تولید را به وجود می‌آورد که با افزایش راندمان انرژی، تولید محلی و بارهای قابل کنترل، نیاز گروه‌های زیادی از مصرف‌کنندگان را تامین می‌کنند. همچنین مدیریت صحیح استفاده از خودروهای الکتریکی که قابلیت اتصال به برق خانگی را دارند، می‌تواند هزینه‌های انرژی مصرف‌کننده را کاهش دهد [۷۰].

در مدیریت سمت مصرف، مشوق‌های مختلفی در رابطه با بهبود زمان و دامنه‌ی الگوی مصرف بار برای مشترکان تعیین می‌شود. اجرای این سیاست یک سری مکانیزم‌های پیشرفته‌ای را معرفی می‌کند تا مصرف‌کنندگان برای شرکت فعالانه در فرایند بهینه‌سازی شبکه، تشویق شوند. بنابراین لازم

است تا مصرف‌کنندگان به تجهیزات کنترلی مجهز شوند که مهم‌ترین آن‌ها کنتور هوشمند می‌باشد. این تجهیزات با شرکت برق ارتباط برقرار کرده و مصرف انرژی مشتریان را مدیریت می‌کنند. مرجع [۷۱] شبکه‌ی هوشمندی را مورد بررسی قرار داده است که در آن برخی از مصرف‌کنندگان دارای منابع تولید پراکنده و ذخیره‌کننده بوده و قادر به شرکت در برنامه‌ی مدیریت مصرف می‌باشند. به کمک یک واحد مستقل مرکزی که بهینه‌سازی انرژی را برای روز آینده انجام می‌دهد، مشترکانی که دارای منابع تولید و ذخیره می‌باشند قادرند تا هزینه‌های انرژی خود را کاهش دهند. این امر می‌تواند با تولید و ذخیره‌ی انرژی توسط مشترک (به جای خرید انرژی از شبکه) محقق شود. در این مطالعه ساختار مساله به صورت یک بازی غیرهمکارانه تشریح شده و استراتژی‌های بهینه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین از مفهوم تعادل نش^۱ برای اعمال برنامه‌ی مدیریتی استفاده شده است که در آن هر بازیکن سعی می‌کند تابع هدف خود را حداقل یا حداکثر نماید. شکل ۲-۶ ارتباطات میان شبکه‌ی هوشمند و یک مشترک فعال^۲ در طرح مدیریت سمت تقاضا را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



کنتور هوشمند (SM^3)، وسایل برقی خانگی (HA^4)، تولید پراکنده (DG)، ذخیره‌کننده انرژی (DS^5)

شکل ۲-۶. تبادل اطلاعات میان شبکه‌ی هوشمند و یک مشترک فعال در طرح مدیریت سمت مصرف [۷۱]

^۱ Nash equilibrium

^۲ Active customer

^۳ Smart meter

^۴ Home appliance

^۵ Distributed storage

منظور از مشترک فعال، مشترکی است که دارای منابع تولید و ذخیره‌ی انرژی می‌باشد. با توجه به این تبادل انرژی، پروفیل بار مصرف‌کننده به صورت رابطه‌ی (۷-۲) خواهد بود.

$$I_n(h) = \begin{cases} e_n(h) & \text{if } n \in P \\ e_n(h) - g_n(h) + s_n(h) & \text{if } n \in N \end{cases} \quad (7-2)$$

P : مشترک غیرفعال

N : مشترک فعال

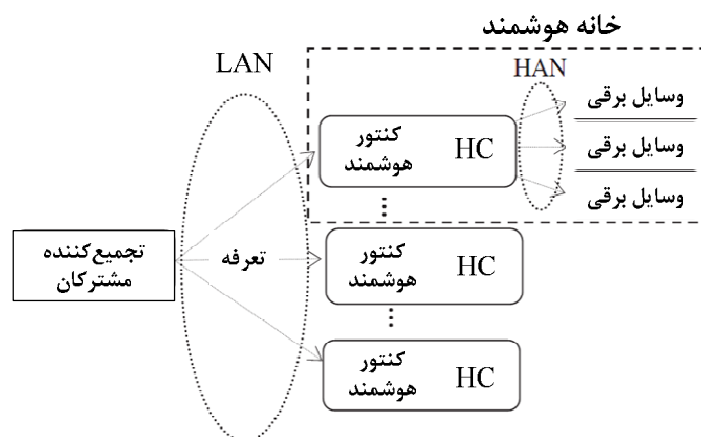
که $e_n(h)$ مقدار انرژی مورد نیاز مصرفی، $g_n(h)$ مقدار تولید توسط مشترک و $s_n(h)$ مقدار ذخیره‌ی انرژی در ذخیره‌کننده‌ی مربوط به مشترک n ام در بازه زمانی h می‌باشد. بسته به اینکه شارش توان به سمت مشترک باشد یا شبکه، $I_n(h)$ در هر زمان می‌تواند مقداری مثبت یا منفی اختیار کند.

در شبکه‌های هوشمند، نقش مصرف‌کننده‌ها و استراتژی‌های پاسخگویی بار آن‌ها در مدیریت انرژی شبکه بسیار پر اهمیت خواهد بود. مرجع [۷۲] با لحاظ نمودن پاسخگویی بار در کنترل هوشمند، یک برنامه‌ریزی متغیر صحیح (MILP) پیشنهاد داده است تا تاثیرات فنی و اقتصادی مولدهای مقیاس کوچک و ذخیره‌سازهای انرژی را بر روی مدیریت انرژی خانه (HEM^۱) بررسی نماید. در این برنامه‌ریزی، سیستم ذخیره‌ساز انرژی، منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی با قابلیت V2G در خانه‌ی هوشمند لحاظ شده‌اند؛ به طوری که مازاد انرژی تولیدی می‌تواند به شبکه تزریق گردد. در این‌جا هدف از اجرای استراتژی مدیریت انرژی، حداقل‌سازی هزینه‌ی برق روزانه بوده که ناشی از اختلاف میان انرژی خریداری شده از شبکه و انرژی فروخته شده به آن (از طریق منابع تولید پراکنده) می‌باشد. قیمت‌های انرژی به صورت ساعتی بوده و این موضوع، موجب ایجاد انگیزه در خرید و فروش انرژی در ساعات مختلف شبانه روز می‌شود. در تحلیل نتایج چندین استراتژی مختلف پاسخگویی بار مورد بررسی قرار گرفته است تا تاثیرات فنی و اقتصادی ذخیره‌سازها و منابع تولید

^۱ Home energy management

پراکنده نشان داده شوند. از طرفی برای بهبود کارایی برنامه‌ریزی در مدیریت انرژی خانه، بارهای پاسخگو که قابلیت جابجایی زمان مصرف دارند، مانند ماشین لباسشویی، نیز در نظر گرفته شده‌اند. همچنین به منظور بررسی تاثیر ظرفیت منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازها بر روی هزینه‌ی روزانه‌ی مشترک، آنالیز حساسیت انجام شده است.

مرجع [۷۳] نیز از طریق برنامه‌ریزی تجهیزات مصرفی در خانه برای حداقل‌سازی هزینه‌ی انرژی، پاسخگویی بار را مورد مطالعه قرار داده است. برنامه‌ریزی بارها تحت تعرفه‌ی متغیر انرژی انجام شده است. نتایج تایید می‌کنند که مصرف‌کننده‌ی خانگی با توجه به قیمت انرژی، قادر است تا بخشی از مصرف خود را جابجا کند. در همین راستا، [۷۴] نیز از ویژگی پاسخگویی بار استفاده نموده و یک روش بهینه را برای در مدار قرار گرفتن بارها (LC^1) در خانه‌ی هوشمند ارائه کرده است. هدف از انجام این کار، حداقل‌سازی هزینه‌ی پرداختی بابت انرژی بوده است. وضعیت (روشن/خاموش) بارهای پاسخگو و شارژ و دشارژ باتری‌های ذخیره و همچنین خودروهای الکتریکی متغیرهای تصمیم‌گیری مساله می‌باشند. ورود بهینه‌ی بارها به مدار موجب می‌گردد تا بارهای پاسخگو، به زمان‌های ارزان‌تر جابجا شوند. منطقی است که این زمان‌ها مربوط به دره‌های پروفیل بار باشند.



کنترلر خانه (HC^1)، شبکه‌ی فضای خانگی (HAN^2)، شبکه‌ی محلی (LAN^4)

شکل ۲-۷. ساختار تبادل اطلاعات بین بازار انرژی و مصرف‌کنندگان خانگی [۷۴]

¹ Load commitment

² Home controller

³ Home area network

⁴ Local area network

شکل ۲-۷ ساختار تبادل اطلاعات بین بازار انرژی و دیگر شرکت کنندگان را در این مطالعه نشان می‌دهد. در این ساختار، سیستم کنترل کننده پس از مشخص شدن قیمت انرژی و با در نظر گرفتن تعرفه‌های متغیر با زمان، مساله‌ی ورود بارها به مدار را حل می‌کند.

۲-۸ سیستم‌های انرژی با حامل‌های متعدد^۱

با توجه به گسترش استفاده از منابع متنوع تولید در شبکه‌ی قدرت، جنبه‌های فنی و اقتصادی استفاده از حامل‌های مختلف انرژی به میزان بیشتری با یکدیگر گره خواهند خورد. از آنجایی که در بسیاری از کشورها مطالعات سیستم‌های انرژی از اهمیت خاصی برخوردار است، پروژه‌هایی در این زمینه در حال انجام می‌باشند. یکی از مهم‌ترین این مطالعات که مربوط به کشور سوئیس می‌باشد، پروژه‌ی "VFEN^۲" بوده که هدف آن، بررسی ساختار سیستم‌های انرژی در آینده است و در دانشگاه زوریخ در حال انجام می‌باشد [۷۵]. در این پروژه انرژی الکتریکی به تنهایی مورد هدف قرار نگرفته و حامل‌های انرژی متعددی در آن لحاظ شده‌اند. یکی از نکات مهم در این پروژه، امکان همکاری بین منابع و حامل‌های مختلف انرژی می‌باشد. در طول انجام پروژه، این نیاز احساس شد که مفهوم هاب انرژی^۳ در رابطه با یکپارچه‌سازی سیستم‌های انرژی مطرح شود. هاب‌های انرژی واحدهایی هستند که امکان تولید، تبدیل و ذخیره انرژی را در داخل خود دارا می‌باشند و تحت این شرایط، یک منبع یا حامل مشخص می‌تواند به منظور تامین بارهای مختلفی بکار گرفته شود [۷۶].

در سیستم‌های انرژی که همکاری میان حامل‌های مختلف مورد توجه است، در نظر گرفتن هاب انرژی برای مدل‌سازی شبکه بسیار سودمند خواهد بود. هاب انرژی را می‌توان به عنوان یک واسطه بین تامین کننده، مصرف کننده و زیرساخت‌های انتقال انرژی در نظر گرفت که این قابلیت را دارد تا در بهره‌برداری بهینه از شبکه‌ی انرژی مورد استفاده قرار بگیرد. از نقطه نظر سیستم، هاب

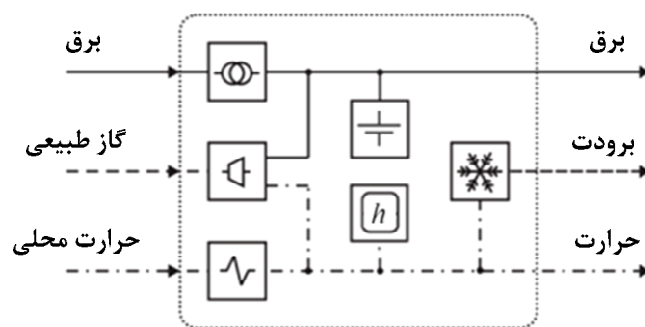
^۱ Multi-carrier energy systems

^۲ Vision of future energy networks

^۳ Energy hub

انرژی نمایانگر حالت کلی تر گره در سیستم الکتریکی است و واحدی است که قابلیت تبدیل و ذخیره-سازی انرژی را دارا بوده و دارای چندین ورودی و خروجی می‌باشد. یک هاب انرژی از طریق پورت‌های ورودی و خروجی، مصرف‌کنندگان را با زیرساخت‌های مختلف انرژی مرتبط می‌سازد [۷۷]. شکل ۲-۸ یک نمونه‌ی ساده از هاب انرژی را نشان می‌دهد که از تجهیزاتی همچون ترانسفورماتور، CHP، مبدل حرارتی و همچنین ذخیره‌کننده‌های الکتریکی و حرارتی تشکیل شده است. این واحد در سمت ورودی به زیرساخت‌های الکتریکی، گاز طبیعی و حرارتی متصل بوده و در سمت خروجی بارهای الکتریکی، حرارتی و برودتی را تامین می‌نماید. این نکته قابل ذکر است که سیستم‌های تولید پراکنده مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، مانند توربین‌های بادی، نیز می‌توانند از اجزای تشکیل دهنده هاب باشند [۷۸].

علاوه بر تولید، تبدیل و ذخیره انرژی که توسط هاب‌ها انجام می‌گیرد، انتقال حامل‌های انرژی نیز یکی از محورهای مطالعاتی مهم در این نوع شبکه‌ها به شمار می‌آید. موضوعات مربوط به طراحی و ساخت یک تجهیز برای انتقال یکپارچه‌ی حامل‌های مختلف توسط برخی از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از پیشنهادات جالب توجه در این زمینه مفهوم اینترکانکتور انرژی است که قادر است انرژی‌های الکتریکی، شیمیایی و حرارتی را توسط یک تجهیز زیرزمینی انتقال دهد [۷۹].



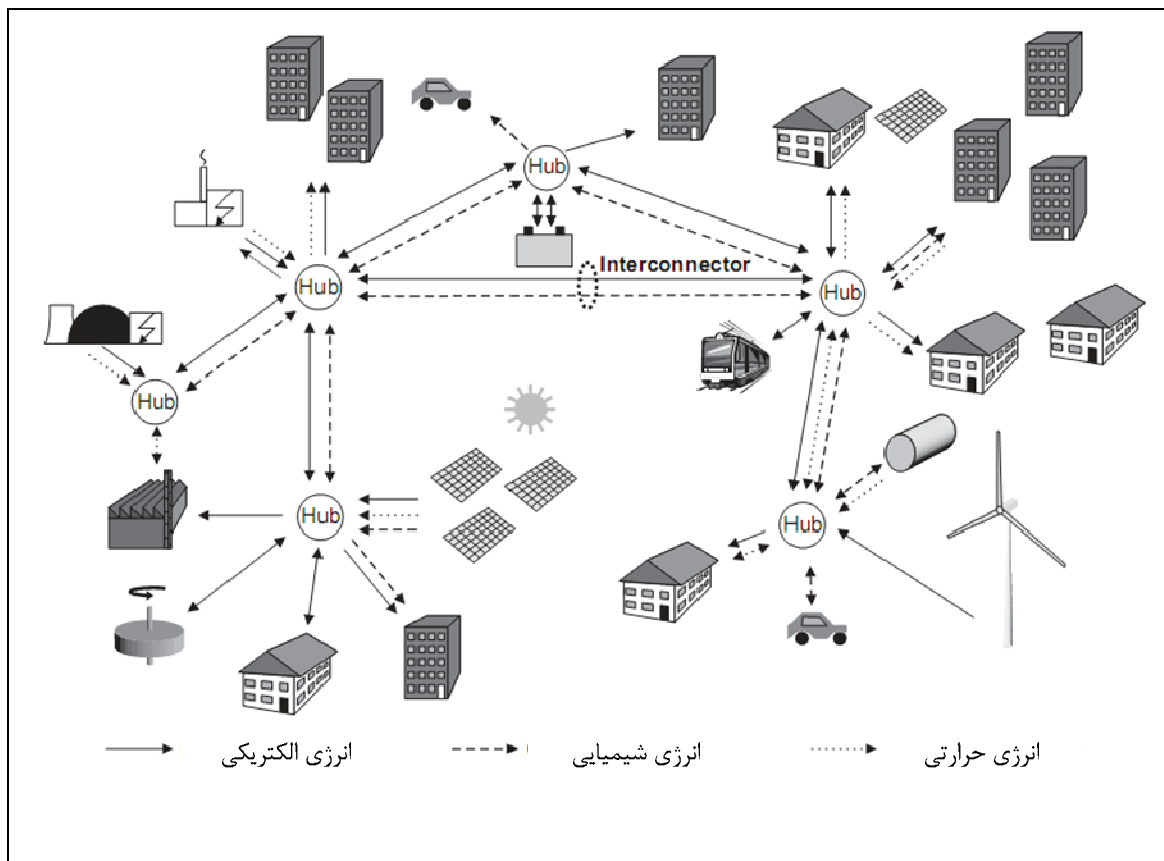
شکل ۲-۸. یک نمونه‌ی ساده از هاب انرژی

با توجه به مطالب ذکر شده، می‌توان هاب‌های انرژی را بخشی از ریزشبکه‌ی هوشمند به حساب آورد. به عبارت دیگر، مفهوم هاب انرژی کاملاً با ماهیت ریزشبکه‌ی هوشمند همخوانی داشته و این امکان وجود دارد تا در مدل‌سازی ریزشبکه، از مفهوم هاب انرژی استفاده شود. تحت این شرایط می‌توان به جای بررسی شبکه‌ی الکتریکی، شبکه‌ی انرژی شامل زیرساخت‌های متعدد را مورد تحلیل قرار داد. با توجه به این موضوع، در این رساله از مفهوم هاب انرژی در برنامه‌ریزی و مدیریت انرژی ریزشبکه استفاده شده است. به همین دلیل بسیاری از فعالیت‌های انجام شده در این زمینه مورد مطالعه قرار گرفته است که برخی از این فعالیت‌ها در بخش ۲-۹ مرور شده است.

۲-۹ مدیریت هاب انرژی

در سیستم‌های انرژی شامل حامل‌های متعدد که همکاری میان انرژی‌های مختلف مورد توجه است، برای مدل‌سازی شبکه می‌توان از مفهوم هاب انرژی به عنوان یک واسطه بین تامین‌کننده، مصرف‌کننده و زیرساخت‌های انتقال انرژی استفاده نمود و آن را در بهره‌برداری بهینه از شبکه‌ی انرژی مورد استفاده قرار داد. یکی از مشخصه‌های مهم هاب انرژی، ماتریس توزیع Γ می‌باشد که بیانگر ارتباط بین حامل‌های سمت ورودی و حامل‌های سمت خروجی آن می‌باشد.

شکل ۲-۹ یک سیستم نمونه با هاب‌های به هم پیوسته را نشان می‌دهد که آرایش داخلی هر یک از آن‌ها با توجه به نیاز ناحیه تعیین می‌شود. بارهای موجود در هر ناحیه از طریق این واحدها، با شبکه‌ی انرژی در ارتباط هستند.



شکل ۲-۹. سیستم نمونه با هاب‌های به هم پیوسته [۸۰]

انتظار می‌رود که در شبکه‌های هوشمند انرژی، منابع و زیرساخت‌های مختلف انرژی چه در فاز برنامه‌ریزی توسعه و چه در فاز بهره‌برداری، بطور همزمان مورد توجه قرار بگیرند. طی سالیان اخیر بهره‌برداری و برنامه‌ریزی توسعه در سیستم‌های انرژی با حامل‌های متعدد در مقالات مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است. (به طور نمونه به مراجع [۸۱] تا [۹۰] مراجعه شود).

هاب‌های انرژی نقش مهمی را در بهره‌برداری و توسعه سیستم‌های انرژی هوشمند ایفا خواهند کرد. به عنوان نمونه شرکت‌های توزیع می‌توانند این واحدها را برای پشتیبانی و اجرای تصمیمات‌شان، مانند مدیریت سمت مصرف، مورد استفاده قرار دهند [۸۱]. از جایی که مشترکان به زیرساخت‌های متعدد انرژی مانند برق، گاز طبیعی و یا حرارت دسترسی دارند، مدیریت هاب انرژی در سیستم‌های هوشمند قابل اجرا خواهد بود. مدیریت هاب انرژی یک مفهوم نسبتاً جدیدی در شبکه‌های توزیع هوشمند می‌باشد که هم برای مصرف‌کنندگان و هم برای شرکت‌های توزیع فوایدی را به همراه خواهد داشت [۸۲].

مطالعات پایه‌ای در زمینه‌ی مدل‌سازی سیستم‌های چندحاملی، توسط مرجع [۷۶] صورت گرفته است. در این مرجع به کمک مفهوم هاب انرژی و با در نظر گرفتن زیرساخت‌های مختلف، روشی برای پخش بار بهینه ارائه شده است. همچنین مشابه با مساله‌ی توزیع اقتصادی بار در سیستم قدرت، برای توزیع بهینه‌ی حامل‌های مختلف انرژی نیز یک شرایط بهینه‌ی کلی حاصل شده است. در توزیع بهینه‌ی انرژی، یک هاب انرژی با ماتریس توزیع Γ در نظر گرفته می‌شود که این ماتریس وابسته به تبدیلات داخلی هاب می‌باشد. سپس برای بار مشخص L و با توجه به تابع هدف، بردار ورودی P به صورت بهینه محاسبه می‌گردد. در مرجع [۷۶]، ساختار کلی مساله‌ی توزیع بهینه‌ی هاب انرژی به صورت رابطه‌ی (۸-۲) بیان شده است.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(P) && (8-2) \\ & \text{subject to } L - \Gamma P = 0 \\ & \underline{P} \leq P \leq \bar{P} \\ & \underline{P}_c \leq NP \leq \bar{P}_c \\ & 0 \leq N \leq 1 \end{aligned}$$

ماتریس N متشکل از ضرایب توزیع بوده که بیانگر تقسیم یک حامل ورودی بین چند مبدل در داخل هاب می‌باشد. در حالت کلی، رابطه‌ی (۸-۲) بیانگر یک مساله‌ی بهینه‌سازی غیرخطی مقید است.

همچنین در این مطالعه، پخش بار بهینه در سیستم به هم پیوسته نیز مورد بررسی قرار گرفته است. پخش بار بهینه‌ی چند حاملی^۱ مربوط به یک سیستم به هم پیوسته بوده که شامل هاب‌های متعدد است؛ در حالی که مساله‌ی توزیع بهینه به یک هاب تنها مربوط می‌شود. برای بار مصرفی متصل به یک هاب، ورودی بهینه و جریان جاری در شبکه بدست می‌آید.

در فاز برنامه‌ریزی توسعه^۲، مرجع [۱۶] یک مدل تصادفی برای طراحی بهینه‌ی سیستم انرژی با حامل‌های متعدد ارائه کرده که در آن عدم قطعیت‌های بار و تولید لحاظ شده است. در این مرجع برای حل مدل پیشنهادی از روش‌های مبتنی بر تجزیه استفاده شده است. همچنین یک مدل ریاضی

^۱ Multi carrier

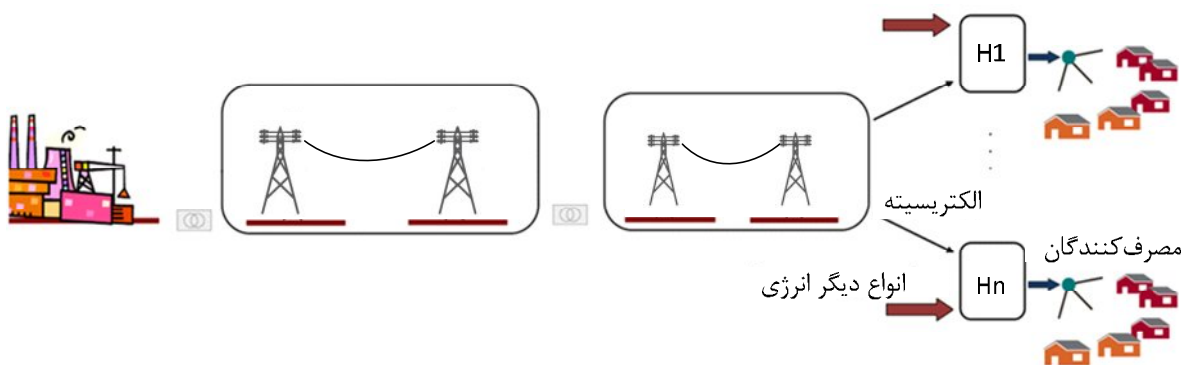
^۲ Expansion planning

برای برنامه‌ریزی توسعه‌ی هاب انرژی در [۸۳] پیشنهاد شده که در این مدل، دو تابع هدف برای حالت قطعی و همچنین تحت شرایط دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده است که این توابع مبتنی بر هزینه می‌باشند. مرجع [۸۴] نیز برنامه‌ریزی توسعه را برای CHPها در سیستم انرژی شامل زیرساخت‌های برق و گاز طبیعی مورد مطالعه قرار داده است. در این مرجع برای محاسبه‌ی مصرف و هزینه‌ی انرژی در هر باس از مدل هاب انرژی استفاده شده است. مرجع [۸۵] یک مدل بهینه برای توسعه‌ی هاب انرژی با حامل‌های متعدد پیشنهاد کرده است. در این مدل، سیستم مورد نظر دارای CHP و مشعل گازسوز بوده است. در برنامه‌ریزی توسعه‌ی پیشنهادی، میزان سرمایه‌گذاری برای واحدهای تولیدی، خطوط انتقال، مشعل گازی و مولدهای همزمان برق و حرارت به صورت بهینه تعیین می‌شود به گونه‌ای که برق و حرارت مورد نیاز تامین گردند. مرجع [۷۷] نیز مدلی برای تحلیل قابلیت اطمینان در سیستم‌های انرژی یکپارچه ارائه کرده است. با کمک این مدل، قابلیت اطمینان تامین شدن بار و میزان انرژی تامین نشده‌ی مورد انتظار^۱ بدست می‌آید. همچنین در مرجع [۸۶]، الگوریتمی برای طراحی بهینه‌ی هاب‌های انرژی به هم پیوسته پیشنهاد شده است که در آن از روش مونت کارلو برای بررسی تاثیر عدم قطعیت قیمت و بار مصرفی بر روی تحلیل نتایج اقتصادی استفاده نموده است.

در فاز بهره‌برداری نیز همانطور که گفته شد، مرجع [۷۶] توزیع بهینه و همچنین پخش بار بهینه در سیستم‌های انرژی شامل حامل‌های متعدد را به کمک هاب انرژی مورد مطالعه قرار داده است. مرجع [۸۷] نیز با در نظر گرفتن انرژی‌های نو و استفاده از مفهوم هاب انرژی، مساله‌ی پخش بار بهینه با حامل‌های متعدد را مورد بررسی پرداخته است. در این مساله، انرژی‌های نو به عنوان یک ورودی در نظر گرفته می‌شوند اما بر خلاف ورودی‌های دیگر، متغیر نامعلومی برای بهینه‌سازی ندارند. البته عدم قطعیت در مدل مذکور دیده نشده است. همچنین در مرجع [۸۸] به توزیع اقتصادی حامل‌های متعدد انرژی با در نظر گرفتن انرژی بادی پرداخته شده است. در مدل پیشنهادی، انرژی

^۱ Expected energy not supplied

باد به عنوان یکی از ورودی‌ها مورد نظر قرار گرفته است و موجب شده تا مساله‌ی توزیع اقتصادی هاب انرژی، احتمالی شود. مدل ارائه شده بر اساس سیستم چندعاملی بوده که به دنبال یافتن جواب بهینه برای توزیع اقتصادی می‌باشد. البته در این مرجع ذخیره‌ساز انرژی مورد توجه قرار نگرفته است. در مرجع [۸۹] نیز به منظور مدیریت انرژی، ساختار شبکه‌ی قدرت همانند شکل ۲-۱۰ پیشنهاد شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، بارهای مشترکان به واسطه‌ی هاب‌ها با شبکه‌ی انرژی ارتباط دارند. مدیریت سمت مصرف بر عهده‌ی هاب‌ها بوده و بهره‌بردار سیستم توزیع، شبکه را در سمت ورودی مدیریت می‌کند. تابع هدفی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است، از جنس هزینه بوده تا برنامه‌ریزی شبکه را برای ۲۴ ساعت آینده تعیین کند. در این برنامه‌ریزی، مقدار بهینه‌ی انرژی قابل فروش به هاب‌های مختلف را تعیین می‌کند. همچنین، میزان توانی که بایستی هر یک از این واحدها بابت کاهش محدودیت‌های شبکه از مصرفشان کم کنند (تا سیستم در حالت بهینه و مطمئن کار کند) از دیگر خروجی‌های این مساله است.



شکل ۲-۱۰. ساختار پیشنهادی سیستم قدرت با حضور هاب‌های انرژی در شبکه [۸۹]

مرجع [۸۲] یک مدل بهینه‌سازی برای هاب انرژی در بخش خانگی ارائه داده است که این مدل می‌تواند در فناوری‌های مرتبط با تصمیم‌گیری شبکه‌ی هوشمند تعبیه شود و قادر است تمامی بارها، منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازها را به صورت بهینه کنترل کند. در این مرجع چندین تابع هدف در سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده است که شامل هزینه‌ی انرژی، مصرف انرژی، مقدار آلاینده‌ی و کاهش پیک بار می‌باشد. همچنین در یک سناریوی مجزا تابع چند هدفه نیز مورد مطالعه

قرار گرفته است. در [۹۰] نیز مدیریت بار در یک مجتمع صنعتی از طریق سیستم مدیریت هاب انرژی مدل‌سازی شده است. هدف از این مدیریت، برنامه‌ریزی بهینه‌ی فرایندهای صنعتی بوده است. بدین منظور یک تابع هدف برای حداقل‌سازی هزینه‌ی مشترک صنعتی و همچنین یک سری قیود تساوی و نامساوی که بیانگر فرایند صنعتی، سیستم توزیع و الزامات بهره‌برداری می‌باشد، مدل‌سازی گردیده است. در [۸۲] یک مدل بهینه‌سازی برای هاب انرژی مسکونی در یک شبکه‌ی هوشمند ارائه شده است. البته عدم قطعیت مربوط به منابع تولید تجدیدپذیر در آن دیده نشده است. در [۸۵] یک شیوه‌ی جدید برای مدل‌سازی هاب انرژی در ناحیه‌ی مسکونی ارائه شده و مدل MINLP برای برنامه‌ریزی تولید توسط هاب انرژی ارائه شده است. در این مطالعه نیز استفاده از منابع تجدیدپذیر لحاظ نشده است. همچنین در [۹۱] یک روش برای برنامه‌ریزی انرژی روز آینده در یک سیستم انرژی شهری پیشنهاد شده است که در آن قابلیت تغییرپذیری ساختار شبکه‌ی توزیع نیز در نظر گرفته شده است. مرجع [۹۲] نیز بهره‌برداری بهینه‌ی سیستم‌های انرژی با حامل‌های متعدد را مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله برنامه‌های پاسخگویی بار برای بارهای الکتریکی و حرارتی در نظر گرفته شده است؛ هرچند که بحث وارد کردن واحدهای تولیدی به مدار در آن دیده نشده است. برای لحاظ نمودن عدم قطعیت‌ها، این مرجع برنامه‌ریزی تصادفی را بکار گرفته است. مرجع [۹۳] یک شیوه‌ی جدید را برای شارژ خودروهای هیبریدی بر اساس مفهوم هاب انرژی ارائه داده است. این مرجع برای بهینه‌سازی چندهدفه، یک عامل به عنوان هماهنگ‌کننده‌ی خودروها را پیشنهاد داده است تا شارژ بهینه‌ی خودروها را از دیدگاه مالک خودروها و بهره‌بردار بدست آورد. در این مطالعه برای شبیه‌سازی از الگوریتم PSO استفاده شده است. مرجع [۹۴] نیز با هدف حداکثرسازی سود، بهره‌برداری از سیستم‌های انرژی چندحاملی را تحت سطوح مختلف عدم قطعیت قیمت مورد بررسی قرار داده است. بدین منظور سیستم با حضور و بدون حضور CHP مورد مطالعه قرار گرفته است. این مقاله از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت بازار انرژی استفاده کرده است. البته تاثیر مولدهای غیر CHP و همچنین خودروهای الکتریکی در آن دیده نشده است.

به منظور مطالعه‌ی بیشتر، بسیاری از فعالیت‌های انجام شده در زمینه‌ی سیستم‌های انرژی چند حاملی و هاب‌های انرژی در مرجع [۹۵] گردآوری و بررسی شده است.

۲-۱۰ جمع‌بندی

در این فصل به بحث مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها پرداخته شد. از جایی که نفوذ خودروهای الکتریکی به عنوان یک پارامتر کلیدی در شبکه‌های هوشمند مطرح می‌باشد، در ابتدا مفاهیم مهم در رابطه با مدیریت انرژی این خودروها مورد توجه قرار گرفت. سپس مدیریت انرژی در ریزشبکه بیان گردید و به نقش منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر نیز اشاره شد. در این بخش همچنین به برخی از فعالیت‌های انجام شده در رابطه با مدیریت انرژی نیز اشاره گردید. مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی و پارکینگ‌ها، مدیریت انرژی در ریزشبکه، عدم قطعیت‌های مرتبط با برنامه‌ریزی انرژی، مدیریت انرژی در سمت مصرف‌کنندگان و همچنین شبکه‌های شامل حامل‌های انرژی متعدد، محورهای این مطالعات بودند. در فصل بعدی مدل برنامه‌ریزی خودروهای الکتریکی بیان خواهد شد و همچنین مدیریت انرژی در یک ریزشبکه که خودروهای الکتریکی در آن حضور دارند، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

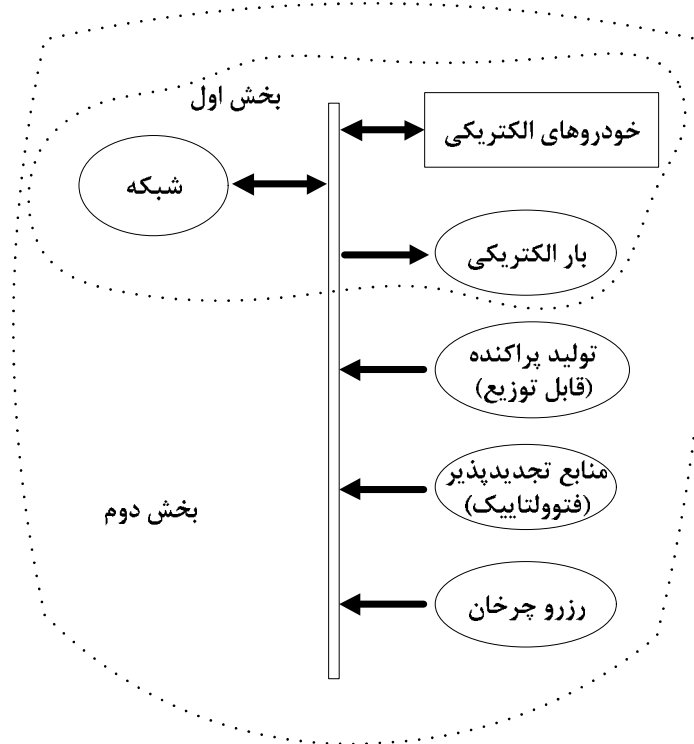
فصل سوم:

مدیریت انرژی ریزشکده با وجود خودروهایی الکتریکی

۳-۱ مقدمه

همان طور که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شد، در آینده‌ای نزدیک انتظار می‌رود خودروهای برقی مبتنی بر باتری، سهم قابل توجهی از بار شبکه را به خود اختصاص دهند. با هوشمندسازی شبکه و ایجاد زیرساخت‌های ارتباطی دوسویه، خودروهای الکتریکی می‌توانند به شبکه‌ی توزیع متصل شوند و قادر خواهند بود تا در برخی مواقع به عنوان یک منبع ذخیره‌ی انرژی عمل کنند. البته باید توجه داشت که شارژ بدون کنترل خودروها توسط مصرف‌کنندگان اگر با پیک بار شبکه همزمان گردد، می‌تواند مشکلاتی را به همراه داشته باشد. اخیراً مطالعات مختلفی در رابطه با مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی انجام شده است که نیاز به زیرساخت‌های ارتباطی هوشمند، وجه مشترک تمامی این مطالعات می‌باشد.

با توجه به این که خودروی الکتریکی به عنوان یکی از اجزای مهم ریزشبکه در این رساله است، این فصل به دو بخش کلی تقسیم می‌شود که ساختار آن در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، بخش اول به مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در یک دوره زمانی می‌پردازد. این کار با هدف درک بهتر مساله‌ی مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی انجام شده است. در حال حاضر در بسیاری از کشورها، برای مصرف‌کنندگانی که مجهز به منابع تولید پراکنده هستند و قادر به تزریق توان به شبکه می‌باشند، تعرفه‌های تشویقی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این امر، در این بخش نیز تعرفه‌ی متفاوت برای خرید و فروش انرژی الکتریکی در نظر گرفته شده و رسیدن به حداقل هزینه‌ی انرژی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۱. ساختار مطالعاتی مدیریت انرژی ریزشبکه با حضور خودروهای الکتریکی

همچنین بخش دوم 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 که 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 تصادفی دومرحله‌ای [۹۶] استفاده شده است. در این مساله، ریزشبکه برای خرید (فروش) انرژی از (به) بازار روز آینده، برنامه‌ریزی انرژی را انجام می‌دهد. از آنجا که قیمت انرژی از روز قبل مشخص می‌شود، بهره‌بردار ریزشبکه نیاز الکتریکی خود را روز قبل به شبکه‌ی بالادست اعلام می‌کند. در این مطالعه فرض شده است که سیستم مدیریت انرژی ریزشبکه به قیمت‌های بازار روز آینده دسترسی دارد. با توجه به ساختار مساله، برنامه‌ریزی انرژی به صورت یک برنامه‌ریزی تصادفی خطی مختلط با عدد صحیح پیشنهاد شده است و نتایج شبیه‌سازی برای یک سیستم نمونه مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲-۳ بخش (الف). برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی

۱-۲-۳ مدل شارژ/دشارژ خودروی الکتریکی

هنگامی که خودروهای الکتریکی به شبکه وصل باشند، مقدار انرژی ذخیره شده در باتری آن‌ها می‌تواند تغییر نماید. ساده‌ترین حالت اینگونه است که با اتصال خودرو به شبکه، فرایند شارژ باتری شروع می‌شود. اما در حالت پیشرفته‌تر و هنگامی که سیستم شارژر خودروها از نوع هوشمند باشد، شروع و پایان این فرایند می‌تواند به صورت بهینه در طول زمان اتصال مشخص شود. در خودروهای الکتریکی مدرن با قابلیت V2G نیز این امکان وجود دارد تا در صورت نیاز، انرژی موجود در باتری خودروها به شبکه تزریق شود که مستلزم وجود زیرساخت‌های دو طرفه می‌باشد. در مدیریت انرژی مرتبط با خودروهای الکتریکی، اگر خودرو به شبکه متصل باشد، انرژی ذخیره شده در باتری خودرو را می‌توان طبق رابطه‌ی (۱-۳) محاسبه نمود.

$$E_{i,t} - E_{i,t-1} = [\eta_i^{ch} \times P_{i,t}^{ch} - \frac{1}{\eta_i^{dch}} P_{i,t}^{dch}] \Delta t \quad (1-3)$$

که حروف و علائم استفاده شده در این معادله طبق زیر می‌باشند:

$P_{i,t}^{ch}$: توان شارژ خودروی i ام در زمان t

$P_{i,t}^{dch}$: توان دشارژ خودروی i ام در زمان t

$E_{i,t}$: انرژی ذخیره شده در باتری خودروی i ام در زمان t

$\eta_i^{dch}, \eta_i^{ch}$: راندمان شارژ و راندمان دشارژ باتری خودروی i ام

Δt : گام زمانی برنامه‌ریزی

اگر خودرو به شبکه وصل نباشد، طبق (۲-۳) مقدار انرژی موجود در باتری خودرو با توجه به مسافت طی شده کاهش می‌یابد. همچنین باید توجه داشت که مقدار انرژی ذخیره شده در باتری خودروها به دلایل فنی نمی‌تواند از حد مشخصی بیشتر و یا کمتر شود.

$$E_{i,t} - E_{i,t-1} = -d_{i,t} \times E_i^{trip} \quad (۲-۳)$$

$$E_{i,\min} \leq E_{i,t} \leq E_{i,\max} \quad (۳-۳)$$

که در این روابط:

E_i^{trip} : انرژی مصرفی خودروی i ام در هر کیلومتر

$d_{i,t}$: مسافت طی شده‌ی خودروی i ام در زمان t

$E_{i,\min}, E_{i,\max}$: به ترتیب حداکثر و حداقل انرژی ذخیره شده‌ی مجاز در باتری خودروی i ام

می‌باشند. باید توجه داشت که وقتی خودرو به شبکه وصل باشد، نمی‌توان تحت هر شرایطی باتری آن را دشارژ نمود. مالکان خودروها انتظار دارند تا سطح انرژی باتری خودروهایشان هنگامی که از شبکه جدا می‌شوند، از یک حد مشخصی کمتر نباشد.

$$E_{i,t} \geq E_{i,\min}^{dep}, \forall t \in t_{i,dep} \quad (۴-۳)$$

در رابطه‌ی (۴-۳)، $t_{i,dep}$ زمان‌های جدا شدن خودروی i ام از شبکه و $E_{i,\min}^{dep}$ حداقل انرژی مورد نیاز خودروی i ام در لحظه‌ی جدا شدن از شبکه می‌باشد.

میزان توان شارژ و دشارژ خودروها نیز دارای محدودیت است. همچنین یک خودرو نمی‌تواند

به طور همزمان در یک لحظه شارژ و دشارژ شود. بدین منظور از متغیرهای باینری r, s در مدل‌سازی

استفاده می‌شود. بنابراین قیود شارژ و دشارژ خودروها می‌توانند به صورت زیر بیان شوند.

$$P_{i,t}^{dch} \leq r_{i,t} \times P_{i,\max}^{dch} \quad (۵-۳)$$

$$P_{i,t}^{ch} \leq s_{i,t} \times P_{i,\max}^{ch} \quad (۶-۳)$$

$$P_{i,t}^{dch}, P_{i,t}^{ch} \geq 0 \quad (۷-۳)$$

$$r_{i,t} + s_{i,t} \leq 1 \quad (۸-۳)$$

$$s, r \in \{1, 0\} \quad (۹-۳)$$

که حروف و علائم استفاده شده در این روابط طبق زیر می‌باشند:

حداکثر توان شارژ خودروی i ام : $P_{i,max}^{ch}$

حداکثر توان دشارژ خودروی i ام : $P_{i,max}^{dch}$

متغیرهای باینری مربوط به شارژ شدن خودروی i ام در زمان t : $r_{i,t}$

متغیرهای باینری مربوط به دشارژ شدن خودروی i ام در زمان t : $s_{i,t}$

از آنجا که شارژ و دشارژ شدن باتری‌ها بر روی طول عمر آنها تاثیر می‌گذارد، تعداد تغییر وضعیت^۱ بین حالت شارژ و دشارژ در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی نیز محدود می‌شود [۶۳].

$$D_i \leq N_{max} \quad (۱۰-۳)$$

D_i تعداد تغییر وضعیت شارژ و دشارژ و N_{max} حداکثر تعداد مجاز تغییر وضعیت در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی می‌باشند.

۳-۲-۲ برنامه‌ریزی خودروهای الکتریکی

اگر تعدادی خودرو در یک ناحیه مانند یک مجتمع مسکونی وجود داشته باشند، در هر لحظه توان دریافتی از شبکه باید با میزان بار مصرفی برابر باشد.

$$D_t + \sum_i P_{i,t}^{ch} - \sum_i P_{i,t}^{dch} - P_t^{grid} = 0 \quad (۱۱-۳)$$

که D_t میزان بار مصرفی مجتمع و P_t^{grid} توان مبادله شده با شبکه در لحظه‌ی t می‌باشد.

اگر فرض شود این شارژ/دشارژ در محیط شبکه‌ی هوشمند انجام شود، در هر لحظه یا توان از شبکه دریافت می‌شود ($u_t = 1$) و یا اینکه توان به شبکه تحویل داده می‌شود ($u_t = 0$). تحت این شرایط، قیود دریافت و تزریق توان به صورت زیر می‌باشد.

$$P_t^{grid} = P_t^{fg} - P_t^{tg} \quad \forall t \quad (۱۲-۳)$$

^۱ Switching

$$P_t^{fg} \leq u_t \times P^{\max g} \quad (13-3)$$

$$P_t^{tg} \leq (1-u_t) \times P^{\max g} \quad (14-3)$$

$$P_t^{fg}, P_t^{tg} \geq 0 \quad (15-3)$$

$$u_t \in \{0,1\} \quad (16-3)$$

که حروف و علائم استفاده شده در این معادله طبق زیر می‌باشند:

P_t^{fg} : توان دریافتی از شبکه در زمان t

P_t^{tg} : توان تحویلی به شبکه در زمان t

u_t : متغیر باینری بابت دریافت توان از شبکه در زمان t

$P^{\max g}$: حداکثر توان تبدالی با شبکه‌ی اصلی

۳-۲-۳ تابع هدف برنامه‌ریزی بهینه

همانگونه که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شد، معیارهای مختلفی را می‌توان به عنوان تابع هدف برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی در نظر گرفت. اما یکی از معمول‌ترین توابع هدف، حداقل‌سازی هزینه بابت خرید انرژی از شبکه می‌باشد. در این بخش نیز هدف از مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی، رسیدن به حداقل هزینه در نظر گرفته شده است. این هزینه از اختلاف انرژی خریداری شده و فروخته شده به شبکه حاصل می‌گردد.

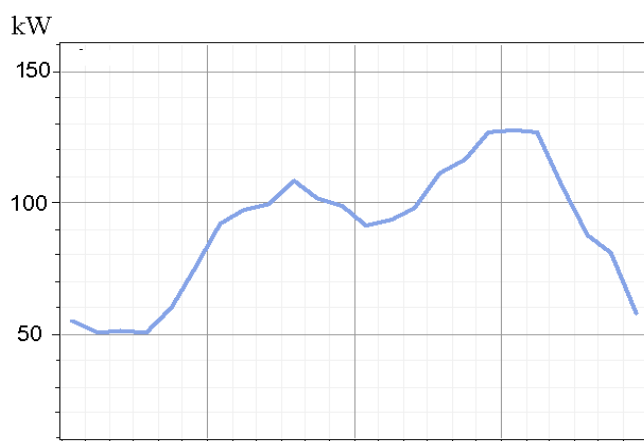
$$\text{Min } F = \sum_t f_t \quad (17-3)$$

$$f_t = (\pi_t^{fg} P_t^{fg} - \pi_t^{tg} P_t^{tg}) \times \Delta t \quad \forall t$$

که π_t^{fg}, π_t^{tg} به ترتیب قیمت خرید و فروش انرژی در زمان t می‌باشند.

۴-۲-۳ بررسی یک سیستم نمونه

برای شبیه‌سازی برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی، یک سیستم نمونه در نظر گرفته شده است. مجتمع مورد مطالعه دارای الگوی بار مصرفی (به جز خودروهای برقی) مطابق با شکل ۲-۳ می‌باشد.



شکل ۳-۲. الگوی بار مصرفی در سیستم مورد مطالعه [۹۷]

در محیط شبکه‌ی هوشمند، فرض شده است که قیمت در هر ساعت همان قیمت بازار انرژی می‌باشد. برای یک دوره زمانی ۲۴ ساعته، قیمت انرژی خریداری شده از شبکه در جدول ۳-۱ آورده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، قیمت انرژی الکتریکی در هر ساعت تغییر می‌کند؛ طوری که بین ساعت ۱۰ الی ۱۴ به بالاترین حد خود می‌رسد. به منظور تشویق مشترکان برای فروش انرژی به شبکه، قیمت فروش انرژی ۱/۱ برابر قیمت خرید در نظر گرفته شده است. برای این مجتمع، ۲۰ خودروی الکتریکی فرض شده است. برخی از مشخصات این خودرو در جدول ۳-۲ آورده شده که مشابه مشخصات خودروی Volkswagen E-Golf می‌باشد [۱۰۱]. خودروها ممکن است در طول شبانه‌روز در ساعات مختلفی به شبکه وصل شوند. به همین دلیل برای اتصال خودروها به شبکه، سه الگوی مختلف لحاظ شده است. جدول ۳-۳ وضعیت اتصال خودروها را نشان می‌دهد. با توجه به این الگو، تعداد خودروهای متصل به شبکه در هر ساعت را می‌توان در شکل ۳-۳ مشاهده نمود. در این مطالعه فرض شده است هنگامی که خودروها از شبکه جدا می‌شوند، باید حداقل ۶۰٪ شارژ داشته باشند. تعداد تغییرات وضعیت بین حالت شارژ و دشارژ در طول شبانه‌روز نیز نباید از ۳ سیکل بیشتر شود. همچنین مقدار مسیر طی شده در هر ساعتی که خودرو خارج از منزل می‌باشد، به کمک توزیع یکنواخت $U : (0 \text{ km}, 4 \text{ km})$ تخمین زده شده است.

جدول ۱-۳. قیمت خرید برق [۹۷]

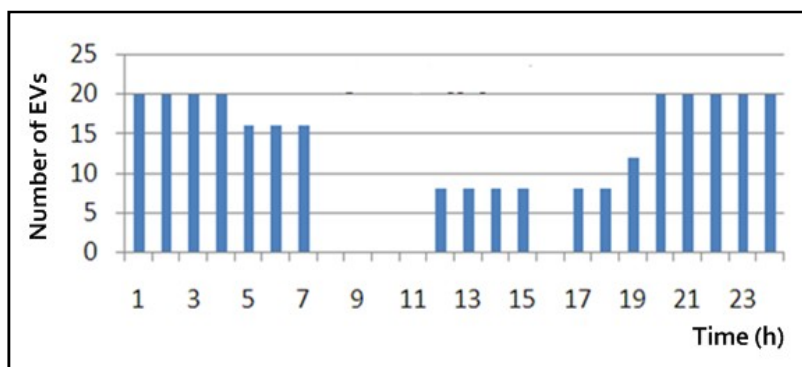
زمان	قیمت (\$/kWh)	زمان	قیمت (\$/kWh)	زمان	قیمت (\$/kWh)	زمان	قیمت (\$/kWh)
19	0.050	13	0.215	7	0.033	1	0.033
20	0.061	14	0.272	8	0.054	2	0.027
21	0.181	15	0.216	9	0.215	3	0.020
22	0.077	16	0.209	10	0.272	4	0.017
23	0.043	17	0.086	11	0.272	5	0.017
24	0.037	18	0.059	12	0.272	6	0.029

جدول ۲-۳. مشخصات خودروی الکتریکی

واحد	مقدار	پارامتر
-	20	تعداد خودرو
-	0.93	راندمان شارژ و دشارژ
kWh	24	ظرفیت باتری
kWh	3.6	حداقل سطح انرژی
kWh	14.4	حداقل سطح شارژ قبل از جدا شدن از شبکه
kW	7.2	حداکثر توان شارژ/دشارژ
kWh / km	0.13	میانگین مصرف انرژی

جدول ۳-۳. الگوی اتصال خودروها به شبکه

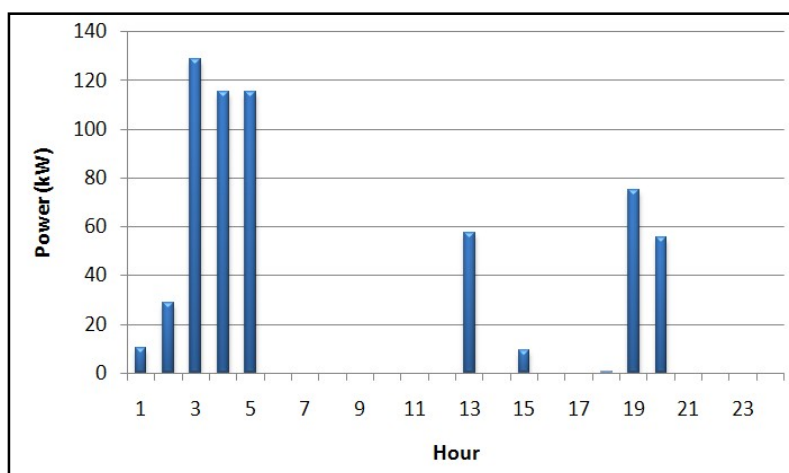
الگوی اتصال	ساعت اتصال
الف	1-6 , 17-24
ب	1-6, 12-15, 20-24
ج	1-4, 19-24



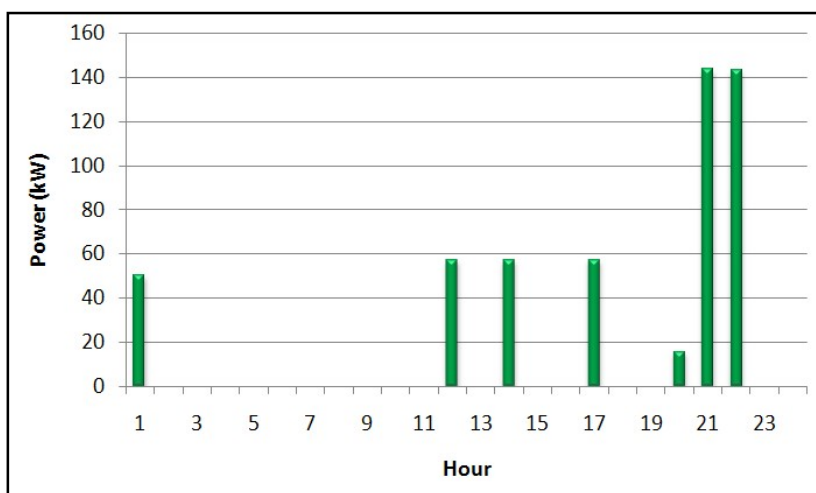
شکل ۳-۳. تعداد خودروهای متصل به شبکه در هر ساعت

- اعمال برنامه‌ریزی و تحلیل نتایج

تابع هدف و معادلات حاکم بر سیستم بصورت یک برنامه‌ریزی خطی مختلط با عدد صحیح، در محیط GAMS شبیه‌سازی شده و نتایج استخراج شده‌اند. بر همین اساس شکل‌های ۳-۴ و ۳-۵ الگوی بهینه‌ی تبادل توان را برای خودروهای در حال شارژ و خودروهای در حال دشارژ نشان می‌دهند. همانگونه که مشاهده می‌شود، در ساعاتی که خودروها به شبکه متصل بوده و قیمت انرژی در آن ساعات بیشتر هستند، خودروها به عنوان یک منبع ذخیره انرژی به تامین بارها کمک می‌نمایند. هر چند به دلیل این که الگوی متصل شدن خودروها به شبکه متفاوت است، ممکن است برخی خودروها در ساعات غیر ارزان (مانند ساعت ۱۵) نیاز به شارژ شدن داشته باشند.

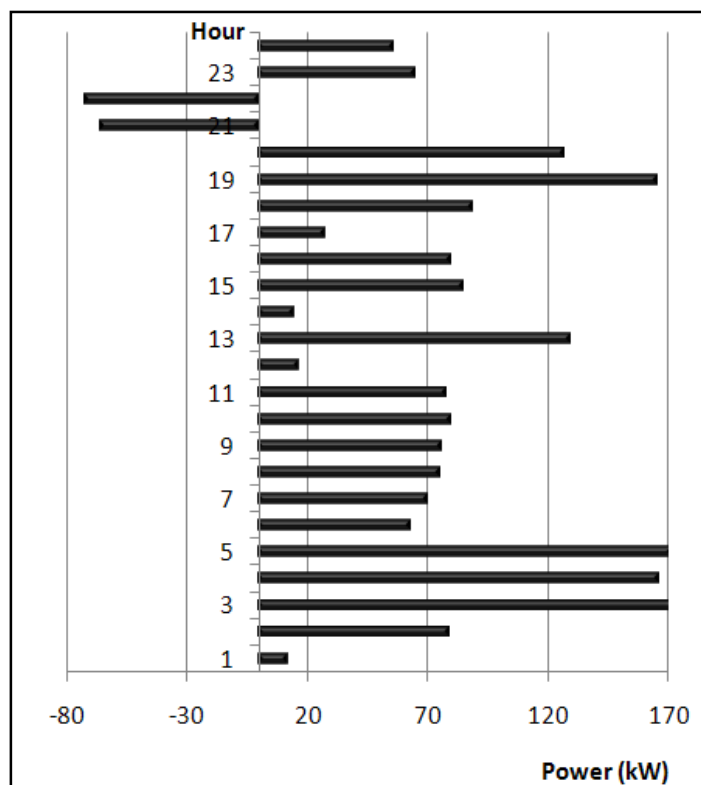


شکل ۳-۴. الگوی بهینه‌ی شارژ خودروها در طول شبانه‌روز



شکل ۳-۵. الگوی بهینه‌ی تولید انرژی توسط خودروها در طول شبانه‌روز

همچنین نتایج شبیه‌سازی برای مقدار شارش توان از سمت مجتمع به شبکه (V2G) در شکل ۳-۶ آورده شده است. این شکل اهمیت برنامه‌ریزی انرژی را نیز بیان می‌کند؛ به عنوان نمونه اگر خودروهای برقی قادر به تزریق توان به شبکه نباشند، آنگاه تمامی پیک بار مصرفی نشان داده شده در شکل ۳-۲ باید از شبکه‌ی بالادستی خریداری گردد. اما قابل مشاهده است که در بسیاری از ساعات شبانه‌روز خودروهای برقی بخش قابل توجهی از بار را بصورت محلی پاسخ می‌دهند. به عنوان مثال، وجود خودروهای الکتریکی موجب شده است تا انرژی دریافتی از شبکه در ساعات ۱۲ الی ۱۷ کاهش پیدا کند. در حالت کلی، شارژ خودروها تا حد امکان به زمان‌هایی که قیمت انرژی ارزان‌تر است، جابجا شده است. حتی در ساعت ۲۱ مقدار توان تبدالی منفی شده است که این موضوع بیانگر شارش توان از سمت مجتمع به شبکه‌ی بالادستی می‌باشد. طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، با اعمال برنامه‌ریزی انرژی خودروهای الکتریکی، هزینه‌ی انرژی مجتمع در طول دوره‌ی شبانه‌روز چیزی در حدود ۱۵۹ دلار خواهد بود.



شکل ۳-۶. تبادل انرژی بین مجتمع مصرف‌کننده و شبکه

۳-۳ بخش (ب) . مدیریت انرژی در ریزشبكة با حضور

خودروهای الکتریکی

با بکارگیری منابع مختلف تولید و همچنین بارهای پاسخگو در ریزشبكة‌ها، به طور یقین مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی در شبکه‌های هوشمند همچنان از محورهای اصلی مطالعات سیستم‌های قدرت خواهد بود. از آنجا که خودروهای الکتریکی از گروه‌های مهم مصرف‌کننده در شبکه‌های آینده به شمار می‌آیند، برنامه‌ریزی بهینه‌ی شارژ/دشارژ خودروها در مدیریت انرژی بسیار مهم خواهد بود. در مدیریت انرژی ریزشبكة، عملکرد بهینه‌ی هر یک از اجزای سیستم مانند منابع تولید پراکنده، ذخیره‌کننده‌ها، بارهای پاسخگو و همچنین خودروهای الکتریکی 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 دوره‌ی برنامه‌ریزی به گونه‌ای انجام می‌شود تا مجموع هزینه‌های بهره‌برداری از دیدگاه مالک ریزشبكة حداقل شود. بدین منظور نیاز است تا روابط حاکم بر سیستم به خوبی مشخص شوند.

بهره‌بردار ریزشبكة موظف به تامین کل بار مصرفی ریزشبكة، 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 (۱۸-۳) ساختار هزینه‌ی کل را در دوره‌ی بهره‌برداری نشان می‌دهد:

$$\text{Min } F = \sum_t (C_t^{\text{grid}} + C_t^{\text{DG}} + C_t^{\text{SU}} + C_t^{\text{EV}}) \quad (18-3)$$

که حروف و علائم استفاده شده در این معادله طبق زیر می‌باشند:

C_t^{grid} : هزینه‌ی تبادل انرژی با شبکه در بازه زمانی t ام

C_t^{DG} : هزینه انرژی خریداری شده از منابع تولید پراکنده در بازه زمانی t ام

C_t^{SU} : هزینه راهاندازی منابع تولید پراکنده در بازه زمانی t ام

C_t^{EV} : هزینه انرژی خریداری شده از خودروهای الکتریکی در بازه زمانی t ام

با توجه به این که مساله مدیریت انرژی در این رساله به صورت تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است، در بخش‌های بعدی تابع هدف به شکل کامل تری بازنویسی خواهد شد.

۳-۱-۳ تشریح تابع هدف و قیود حاکم بر مساله

الف- تبادل انرژی با شبکه اصلی

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

$$P_{\min}^{grid} \leq P_t^{grid} \leq P_{\max}^{grid} \quad (۱۹-۳)$$

که P_{\min}^{grid} ، P_{\max}^{grid} به ترتیب حداکثر و حداقل توان تبدالی می‌باشند. همچنین با توجه به شارش یکطرفه یا دوطرفه انرژی، حد پایین توان تبدالی طبق (۲۰-۳) بیان می‌گردد.

$$P_{\min}^{grid} = \begin{cases} 0 & \text{تبادل توان یکطرفه} \\ -P_{\max}^{grid} & \text{تبادل توان دوطرفه} \end{cases} \quad (۲۰-۳)$$

با در نظر گرفتن گام زمانی Δt ساعت، هزینه تبادل انرژی با شبکه اصلی را می‌توان به صورت (۲۱-۳) نوشت. با توجه به این که در حالت کلی قیمت خرید و فروش انرژی می‌تواند متفاوت باشد و ریزشبه در هر لحظه یا از شبکه انرژی دریافت می‌کند یا به آن تزریق می‌نماید، از متغیر باینری α_t کمک گرفته شده است.

$$C_t^{grid} = \left[\alpha_t \pi_{b,t}^{grid} - (1 - \alpha_t) \pi_{s,t}^{grid} \right] P_t^{grid} \Delta t \quad (۲۱-۳)$$

$$\alpha_t = \begin{cases} 1 & \text{if } P_t^{grid} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22-3)$$

که حروف استفاده شده در این معادلات طبق زیر می باشند:

$$\pi_{b,t}^{grid} \text{ قیمت خرید برق از شبکه در زمان } t$$

$$\pi_{s,t}^{grid} \text{ قیمت فروش برق به شبکه در زمان } t$$

$$P_t^{grid} \text{ توان خالص دریافتی از شبکه‌ی اصلی در زمان } t$$

$$\alpha_t \text{ متغیر باینری مربوط به وضعیت دریافت توان از شبکه در زمان } t$$

به خاطر وجود متغیر α در (21-3)، تابع هدف (18-3) غیر خطی خواهد بود. برای اجتناب از غیر خطی شدن تابع هدف، توان تبدالی خالص با شبکه طبق (23-3) بصورت دو متغیر صحیح در نظر گرفته شده است.

$$P_t^{grid} = P_{t,b}^{grid} + P_{t,s}^{grid} \quad (23-3)$$

به ترتیب توان خریداری شده و فروخته شده به شبکه هستند. از آنجا که مقدار توان

تبدالی با شبکه‌ی اصلی نمی تواند از مقدار حداکثر P_{max}^{grid} تجاوز نماید و همچنین در هر لحظه حداکثر

یکی از دو متغیر $P_{s,t}^{grid}$ ، $P_{b,t}^{grid}$ مقدار غیر صفر دارد، می توان آن ها را به صورت (24-3) تا (26-3) مدل نمود.

$$P_{b,t}^{grid} \leq \alpha_t P_{max}^{grid} \quad (24-3)$$

$$P_{s,t}^{grid} \leq (1 - \alpha_t) P_{max}^{grid} \quad (25-3)$$

$$P_{b,t}^{grid}, P_{s,t}^{grid} \geq 0 \quad (26-3)$$

حال می توان (21-3) را به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$C_{grid}^t = P_{t,b}^{grid} \pi_{t,b}^{grid} - P_{t,s}^{grid} \pi_{t,s}^{grid} \quad (27-3)$$

ب- 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 (۲۸-۳) خواهد بود.

$$C_t^{DG} = \sum_j \pi_{j,t}^{DG} P_{j,t}^{DG} \Delta t \quad (28-3)$$

همچنین هزینه‌ی راه‌اندازی واحدها نیز می‌تواند بصورت زیر مدل شود [۶۳]:

$$C_t^{SU} = \sum_j [w_{j,t} - w_{j,t-1}] \cdot SU_j \quad (29-3)$$

$$[w_{j,t} - w_{j,t-1}] \cdot SU_j \geq 0 \quad (30-3)$$

که 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.

منابع موجود در ریزشبهه دارای محدودیت تولید نیز 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.

$$w_{j,t} \cdot P_{j,\min}^{DG} \leq P_{j,t}^{DG} \leq w_{j,t} \cdot P_{j,\max}^{DG} \quad (31-3)$$

منابع تولید پراکنده می‌توانند مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و یا انرژی‌های تجدیدپذیر باشند.

مهم‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد و خورشید هستند. در این رساله، منبع تجدیدپذیر فتوولتاییک در نظر گرفته شده است که مقدار تولید توسط این سیستم‌ها، به تابش خورشید وابسته می‌باشد. برنامه‌ریزی انرژی برای روز آینده، مستلزم پیش‌بینی میزان تابش خورشید می‌باشد و از طریق آن توان تولیدی سیستم فتوولتاییک را می‌توان تخمین زد.

در صورتی که مقدار تابش خورشید در هر لحظه مشخص باشد، با صرف نظر از تاثیرات دمای

محیط، به کمک (۳۲-۳) می‌توان حداکثر توان قابل استخراج از پنل فتوولتاییک را محاسبه نمود [۶۳].

$$P_t^{PV} = \eta_{pv} \times A_{pv} \times SI_t \quad (32-3)$$

که در این رابطه:

P_t^{PV} : توان خروجی فتوولتاییک در دوره زمانی t

SI_t : مقدار تابش (واحد توان بر واحد سطح) در دوره زمانی t

η_{pv} : راندمان فتوولتاییک

A_{pv} : سطح پنل فتوولتاییک

هستند.

ج - 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 (۳-۳۳) بیان می‌شود:

$$C_t^{EV} = \sum_i \pi_{i,t}^{EV} \cdot P_{i,t}^{dch} \cdot \Delta t \quad (3-33)$$

که $P_{i,t}^{dch}$ و $\pi_{i,t}^{EV}$ به ترتیب توان تحویلی و قیمت پیشنهادی خودروی i در بازه زمانی t ام می‌باشند. به دلیل اینکه روابط مربوط به انرژی ذخیره شده در باتری خودروها ($E_{i,t}$) و همچنین توان شارژ و دشارژ خودروها بطور کامل در بخش قبلی مورد بررسی قرار گرفتند، این روابط در اینجا آورده نشده‌اند.

د- تامین بار و رزرو

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

$$D_t + \sum_i P_{i,t}^{ch} - \sum_i P_{i,t}^{dch} - \sum_j P_{j,t}^{DG} - P_t^{grid} = 0 \quad (3-34)$$

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، بر این اساس خواهیم داشت:

$$R_t^{DG} + R_t^{EV} \geq R_{tot,t} \quad (35-3)$$

در این رابطه، R_t^{EV} ، R_t^{DG} به ترتیب مقدار رزرو چرخان منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی بوده که طبق (36-3) و (37-3) محاسبه می‌گردند. $R_{tot,t}$ نیز حداقل رزرو مورد نیاز ریزشکه در زمان t می‌باشد.

$$R_t^{DG} = \sum_j w_{j,t} \cdot P_{j,max}^{DG} - \sum_j P_{j,t}^{DG} \quad (36-3)$$

$$R_t^{EV} = \sum_i con_{i,t} \cdot \min \left\{ \left(\frac{E_{i,t} - E_{i,min}}{\Delta t} \right), P_{i,max} \right\} \quad (37-3)$$

که $con_{i,t}$ وضعیت اتصال خودروی i ام به شبکه در بازه زمانی t می‌باشد و هنگامی که $con_{i,k} = 1$ باشد یعنی خودروی i ام در در زمان $t = k$ به شبکه متصل است.

با در نظر گرفتن قید رزرو (35-3)، علاوه بر (31-3) باید محدودیت (38-3) نیز اعمال شود که

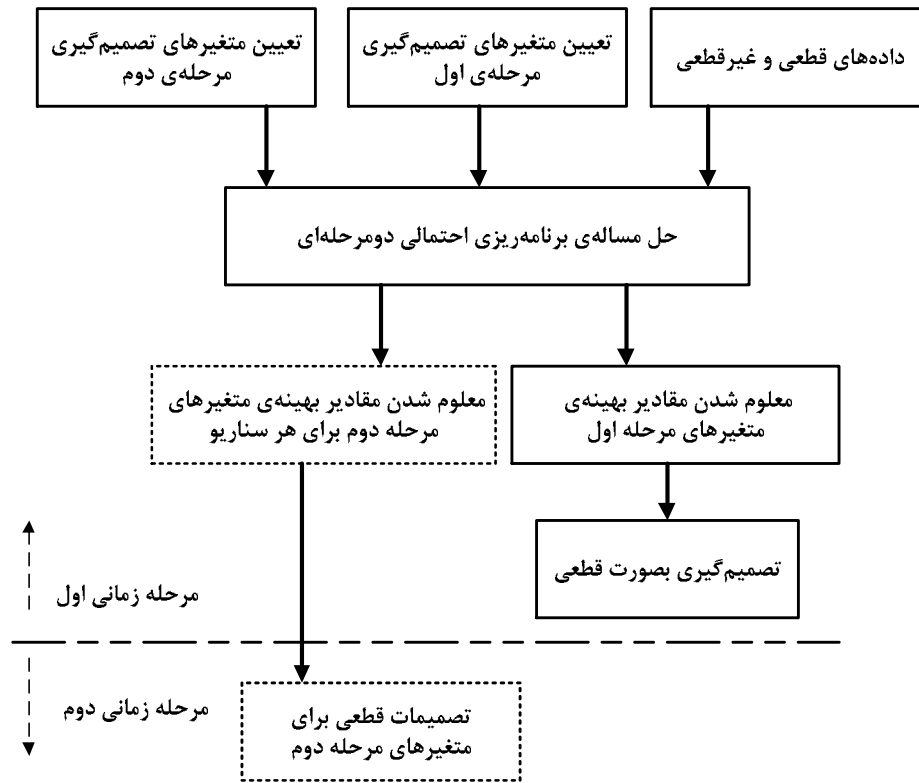
$$R_{j,t}^{DG} \text{ مقدار رزرو مولد } j \text{ ام در زمان } t \text{ می‌باشد.}$$

$$w_{j,t} \cdot P_{j,min}^{DG} \leq P_{j,t}^{DG} + R_{j,t}^{DG} \leq w_{j,t} \cdot P_{j,max}^{DG} \quad (38-3)$$

۲-۳-۳ برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای

عواملی مانند استفاده از منابع تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی انرژی در ریزشکه 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 ریزشکه استفاده شده است. همانگونه که در شکل ۳-۷ 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 [۹۸].



شکل ۳-۷. مفهوم برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای

در اینجا منظور از مرحله‌ی اول و مرحله‌ی دوم، مرحله‌ی زمانی است که عمل تصمیم‌گیری انجام می‌شود. به عنوان مثال در مساله‌ی مورد مطالعه، برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای اینگونه استفاده شده است که بهره‌بردار ریزش‌بکه در مرحله‌ی اول (یعنی روز قبل از شروع بهره‌برداری) بابت میزان خرید انرژی از بازار روز آینده به صورت قطعی تصمیم می‌گیرد در حالی که میزان دقیق تولید فتولتاییک در روز آینده مشخص خواهند شد. به منظور تصمیم‌گیری در محیط غیرقطعی معمولاً از یک توزیع احتمال استفاده می‌شود که خطای پیش‌بینی را نشان می‌دهد [۴۸].

فرم کلی برنامه‌ریزی تصادفی خطی دومرحله‌ای می‌تواند بصورت (۳-۳۹) بیان شود ([۹۶])
 [۹۸]. در این ساختار، بردار متغیرهای $x \in R^n$ و $y \in R^m$ به ترتیب شامل متغیرهای مرحله اول و

مرحله دوم هستند. همچنین $E[.]$ اپراتور امید ریاضی می‌باشد و $\xi = (q, h, T, W)$ نیز بیانگر اطلاعات مربوط به مرحله دوم می‌باشد که بخشی از آن یا تمامی آن غیرقطعی می‌باشد.

$$\begin{aligned} & \text{Min}_x \{c^T x + E[Q(x, \xi)]\} \\ & \text{s.t. } Ax = B, \quad x \geq 0 \\ & \text{where } Q(x, \xi) = \text{Min}_y q^T y \\ & \quad \text{s.t. } Tx + Wy = h, \quad y \geq 0 \end{aligned} \quad (39-3)$$

x : متغیرهای مرحله اول

y : متغیرهای مرحله دوم

$E[.]$: اپراتور امید ریاضی

$\xi = (q, h, T, W)$: اطلاعات مربوط به مرحله دوم

در حالت توزیع گسسته، تعداد محدودی سناریو برای ξ در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی برای هر سناریو داریم: $\xi_s = (q_s, h_s, T_s, W_s)$ که احتمال مربوط به رخداد آن ρ_s می‌باشد. در نتیجه امید ریاضی در (39-3) می‌تواند بصورت (40-3) نوشته شود:

$$E[Q(x, \xi)] = \sum_{s \in S} \rho_s Q(x, \xi_s) \quad (40-3)$$

بنابراین روابط (39-3) را می‌توان بصورت معادل (41-3) بازنویسی کرد.

$$\begin{aligned} & \text{Min}_x \left\{ c^T x + \sum_{s \in S} \rho_s q_s^T y_s \right\} \\ & \text{s.t. } Ax = B \\ & \quad T_s x + W_s y_s = h_s \quad \forall s \\ & \quad x \geq 0, \quad y_s \geq 0 \end{aligned} \quad (41-3)$$

در این مطالعه به کمک نمونه‌برداری از روی تابع چگالی خطای پیش‌بینی، تعداد محدودی سناریو برای تابش خورشید در روز آینده در نظر گرفته شده است. انرژی تبدیلی با شبکه‌ی اصلی، شارژ/دشارژ خودروها و همچنین در مدار قرار گرفتن منابع تولید پراکنده در کل ساعات دوره‌ی

برنامه‌ریزی به عنوان متغیرهای مرحله اول، و میزان تولید منابع موجود در ریزشکه 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 (۳-۱۸) وابسته به سناریویی خواهد بود که رخ می‌دهد.

تحت این شرایط و با توجه به (۳-۲۸)، تابع هدف مربوط به مرحله دوم که مقدار بهینه‌ی آن در زیرمساله تعیین می‌شود را می‌توان به صورت (۳-۴۲) نوشت:

$$C_{t,s}^{DG} = \sum_j \overbrace{\pi_{j,t}^{DG} P_{j,t,s}^{DG}}^{2nd\ stage} \times \Delta t \quad (۳-۴۲)$$

لازم به ذکر است که در این بخش فقط تصمیمات مرحله‌ی اول مورد بررسی قرار گرفته‌اند و برای تصمیمات مرحله‌ی دوم، تنها به مقدار مورد انتظار اکتفا شده است.

در این مطالعه از EMP^۱ به منظور حل مساله‌ی برنامه‌ریزی تصادفی پیشنهادی استفاده شده که در محیط GAMS پیاده‌سازی شده است. EMP قادر است تا مسایل برنامه‌ریزی پیچیده را بازنویسی کند و آن را به صورت برنامه‌ریزی‌های کلاسیک در بیاورد. این موضوع می‌تواند بطور بسیار موثری بر روی سرعت و دقت حل مساله تاثیر بگذارد [۹۹]. همچنین تحت این شرایط می‌توان از حل‌کننده‌های^۲ پیشرفته‌ی موجود در بازار بهره گرفت [۱۰۰]. استفاده از EMP می‌تواند برای بسیاری از انواع مسایل مانند برنامه‌ریزی تصادفی، دو سطحی و برنامه‌ریزی‌های گسته به کار گرفته شود.

۳-۳-۳ بررسی یک سیستم نمونه

- سیستم مورد مطالعه

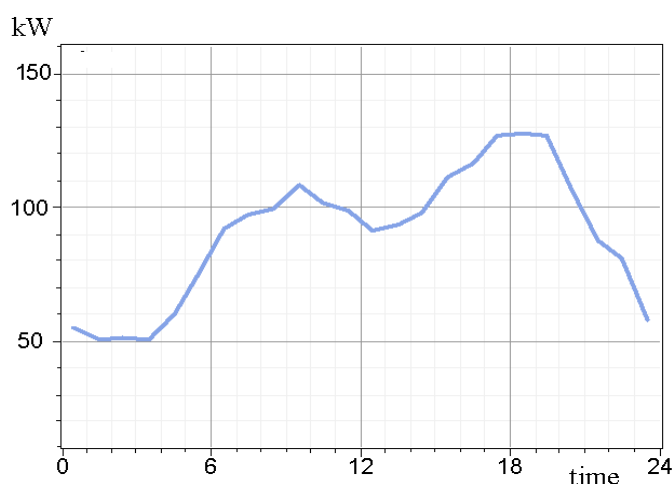
در این بخش، مدل پیشنهادی مدیریت انرژی بر روی یک سیستم نمونه واقع در ناحیه‌ی مسکونی مورد بررسی قرار می‌گیرد. الگوی بار مصرفی ریزشکه‌ی مورد مطالعه، مطابق با شکل ۳-۸

^۱ Extended mathematical programming

^۲ Solver

می‌باشد. منابع تولید پراکنده موجود در این ریزشبه میکروتوربین (MT)، دو پیل سوختی (FC1, FC2) و فتوولتاییک (PV) می‌باشند. مشخصات فنی مولدها نیز در جدول ۳-۴ نشان داده شده است.

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 ۳-۵ آورده شده است. به دلایل فنی اجازه داده نمی‌شود تا سطح انرژی ذخیره‌شده در باتری از ۹۵٪ بیشتر و از ۲۰٪ کمتر گردد [۱۰۲].



شکل ۳-۸. الگوی بار مصرفی ریزشبه

جدول ۳-۴. مشخصات مولدهای ریزشبه [۹۷]

مولد	حداکثر توان (kW)	حداقل توان (kW)	هزینه راه‌اندازی (\$)
میکروتوربین (MT)	30	6	0.14
پیل سوختی ۱ (FC1)	20	3	0.24
پیل سوختی ۲ (FC2)	20	2	0.18

جدول ۳-۵. مشخصات خودروهای الکتریکی

واحد	مقدار	پارامتر
-	20	تعداد خودرو
-	0.93	راندمان شارژ و دشارژ
kWh	24	ظرفیت باتری
kWh	3.6	حداقل سطح انرژی
kWh	14.4	حداقل سطح شارژ قبل از جدا شدن از شبکه
kW	7.2	حداکثر توان شارژ/دشارژ
kWh / km	0.13	میانگین مصرف انرژی

جدول ۳-۶. قیمت پیشنهادی منابع تولید (\$/kWh) [۹۷]

PV	MT	FC2	FC1	ساعت
-	0.107	0.175	0.166	1
-	0.107	0.176	0.166	2
-	0.108	0.176	0.167	3
-	0.108	0.177	0.167	4
-	0.109	0.178	0.167	5
-	0.109	0.179	0.168	6
-	0.110	0.180	0.168	7
0.084	0.111	0.181	0.169	8
0.085	0.112	0.183	0.170	9
0.086	0.112	0.186	0.171	10
0.087	0.116	0.187	0.172	11
0.088	0.117	0.188	0.171	12
0.086	0.115	0.187	0.170	13
0.085	0.115	0.186	0.170	14
0.083	0.115	0.187	0.170	15
0.085	0.117	0.187	0.171	16
0.086	0.118	0.189	0.173	17
-	0.119	0.190	0.173	18
-	0.118	0.191	0.174	19
-	0.115	0.189	0.173	20
-	0.112	0.186	0.171	21
-	0.110	0.185	0.170	22
-	0.109	0.183	0.169	23
-	0.108	0.182	0.167	24

جدول ۳-۷. 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

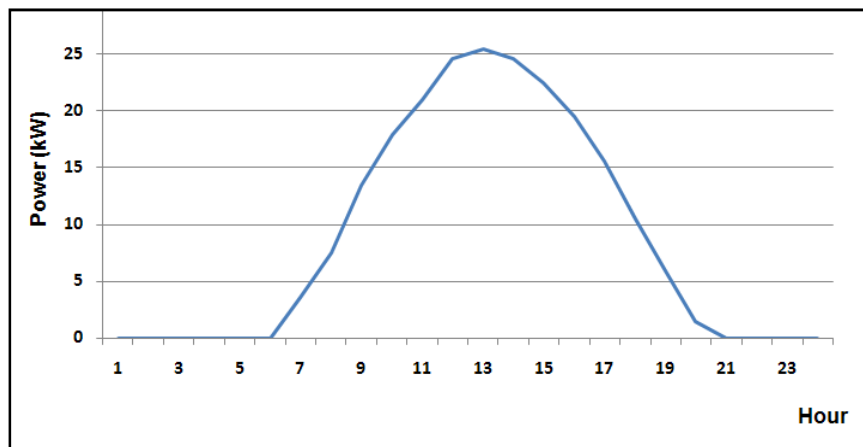
این امکان وجود دارد تا بهره‌بردار ریزش‌بکه، برق را با قیمت بازار انرژی از شبکه‌ی اصلی خریداری نماید. با لحاظ نمودن گام برنامه‌ریزی ۱ ساعته ($\Delta t = 1h$)، قیمت بازار انرژی برای خرید هر کیلووات ساعت برق از شبکه‌ی اصلی، طبق جدول ۳-۱ در نظر گرفته شده است. همچنین قیمت فروش پیشنهادی مولدها برای یک دوره زمانی ۲۴ ساعته، در جدول ۳-۶ آورده شده است. برای خودروها نیز پیشنهاد 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 ۳-۷، تعداد خودروهای متصل به شبکه در ساعات شبانه‌روز به کمک مکانیزم چرخ رولت [۱۰۲] تخمین زده شده است.

با توجه به عدم قطعیت موجود در سطح انرژی باتری خودروها، مقدار شارژ اولیه‌ی خودروها هنگامی که برای اولین بار به شبکه متصل می‌شوند می‌تواند توسط توزیع احتمالی محاسبه گردد. در این مطالعه برای تخمین سطح اولیه‌ی شارژ خودروها هنگام متصل شدن به شبکه، از توزیع یکنواخت در بازه‌ی $(E_{min}, 0.5E_{max})$ استفاده شده است [۶۳]. همچنین با در نظر گرفتن میانگین مسافت پیموده شده در طی شبانه‌روز، مقدار مسیر طی شده در هر ساعتی که خودرو خارج از منزل می‌باشد به کمک توزیع یکنواخت $U : (0 \text{ km}, 4 \text{ km})$ تخمین زده شده است.

بر اساس اطلاعات دریافتی از [۶] و [۲۳]، میزان متوسط تولید فتوولتاییک در یک روز آفتابی در ماه خرداد مطابق شکل ۳-۹ پیش‌بینی شده است. برای لحاظ نمودن عدم قطعیت در پیش‌بینی تابش خورشید در روز آینده، از توزیع نرمال مطابق جدول ۳-۸ استفاده شده است. همچنین در این

مساله فرض شده است که بهره‌بردار ریزشبهه، 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 [۶۳].



شکل ۳-۹. مقدار تولید فتوولتاییک بر اساس تابش پیش‌بینی شده

جدول ۳-۸. توزیع نرمال خطای پیش‌بینی تابش خورشید

ساعت	واریانس
1-12	0.01
13-24	0.02

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

۳-۳-۴ نتایج شبیه‌سازی

تابع هدف و معادلاتی که در بخش‌های قبلی مورد بررسی قرار گرفتند به صورت یک برنامه-ریزی تصادفی خطی مختلط با عدد صحیح در محیط GAMS شبیه‌سازی شده‌اند. با توجه به این که میزان تبادل انرژی با شبکه باید در مرحله زمانی 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 کدام سناریو 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 مقدار توان تولیدی مولدها به عنوان متغیرهای کنترلی مرحله دوم در نظر گرفته شده‌اند.

با اعمال روش پیشنهادی به سیستم نمونه، وضعیت در مدار قرار گرفتن مولدهای ریزشبهک طبق شکل ۳-۱۰-الف حاصل شده است. سلول‌های تیره رنگ، بیانگر در مدار بودن واحدها در آن ساعات می‌باشند. قابل مشاهده است که در ساعات ۹ الی ۱۶، همه‌ی مولدها در مدار هستند. با توجه به قیمت بازار انرژی می‌توان گفت که مدیریت ریزشبهک تمایل دارد تا در ساعاتی که قیمت انرژی الکتریکی 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 می‌باشد، آرایش در مدار بودن واحدها متفاوت با شکل ۳-۱۰-الف خواهد بود. به عبارت دیگر برنامه‌ریزی تصادفی با توجه به سناریوهای پیش رو، تصمیمات فعلی را بگونه‌ای مشخص می‌کند که کل هزینه‌ی مورد انتظار حداقل شود. برای درک بهتر این موضوع، برنامه‌ریزی انرژی با داده‌های میانگین انجام شده است که آرایش ورود واحدها به مدار در شکل ۳-۱۰-ب نشان داده شده است. بنابراین می‌توان دریافت که برنامه‌ریزی تصادفی برای پاسخگویی به عدم قطعیت‌ها، این الزام را به وجود آورده است تا مولد MT برای چند ساعت بیشتر در مدار قرار داشته باشد.

	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																		

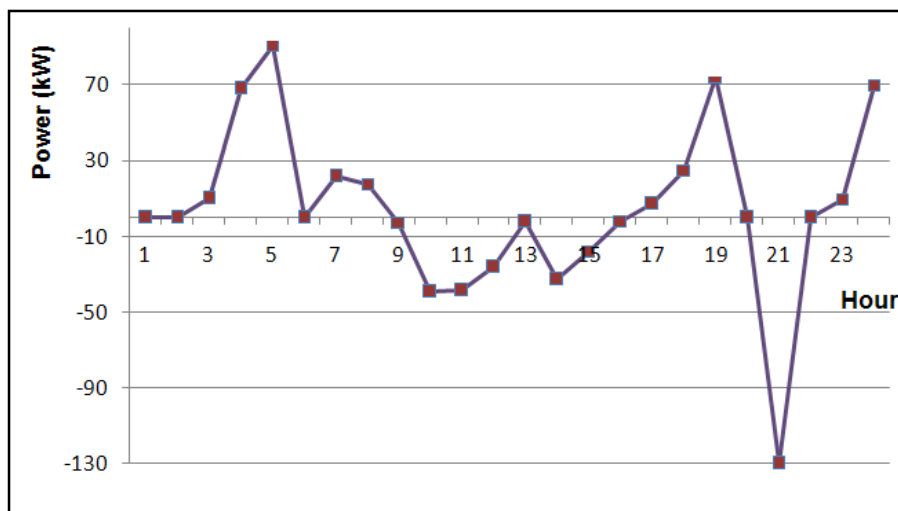
(ب)

شکل ۳-۱۰. وضعیت در مدار قرار گرفتن منابع تولید الف) با وجود عدم قطعیت در پیش‌بینی تولید فتوولتائیک و ب) پیش‌بینی بدون خطا

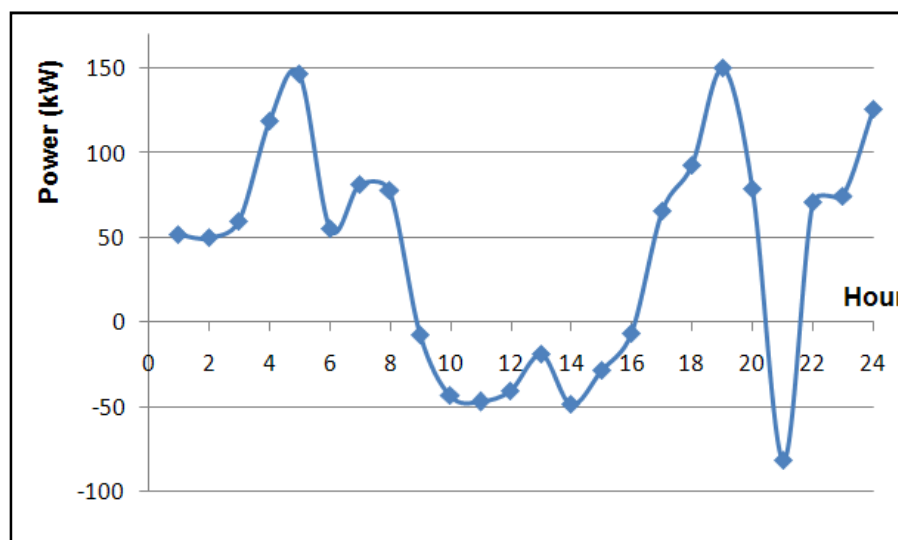
همچنین یکی دیگر از نتایج شبیه‌سازی، میزان توان شارژ و دشارژ خودروها در شبانه‌روز می‌باشد که در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است. در ریزش‌بکه‌ی مورد مطالعه، ظرفیت باتری خودروهای الکتریکی نسبت به دیگر بارها و منابع شبکه قابل توجه بوده و مدیریت شارژ و دشارژ خودروها بخش مهمی از مدیریت انرژی ریزش‌بکه تلقی می‌گردد. با توجه به جدول ۳-۶ و شکل ۳-۱۱ می‌توان دریافت که بهره‌بردار ریزش‌بکه تمایل دارد تا خودروها در زمانی که قیمت انرژی بالاتر است، دشارژ شوند. به همین دلیل در بیشتر زمان‌ها بین ساعات ۹ الی ۱۶ شاهد دشارژ خودروها می‌باشیم؛ هرچند تعداد خودروهای متصل به شبکه در این ساعات کم می‌باشد. در ساعت ۲۱ نیز که قیمت برق بالاتر از ساعات مجاور خود می‌باشد، مدیریت هوشمند انرژی تمایل به دشارژ خودروها داشته و با توجه به این که تعداد خودروهای بیشتری به شبکه متصل هستند، در این زمان توان قابل توجهی به شبکه تحویل داده می‌شود.

نتایج مربوط به میزان تبادل انرژی میان ریزش‌بکه و شبکه‌ی اصلی نیز در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۳-۱۰ و ۳-۱۱ می‌توان دریافت که ساعات کار مولدها و دشارژ خودروها در اکثر اوقات همپوشانی دارند. بنابراین تولید حاصل از مولدها و خودروها در این زمان‌ها موجب می‌شود تا کاهش خرید برق از شبکه‌ی اصلی و همچنین فروش برق به آن در شکل ۳-۱۲ مشاهده شود. به عبارت دیگر، انگیزه‌ی اقتصادی موجب شده است تا مدیریت ریزش‌بکه علاوه بر این که انرژی مورد نیاز را از طریق منابع محلی و خودروهای الکتریکی تامین نماید، فروش انرژی به شبکه

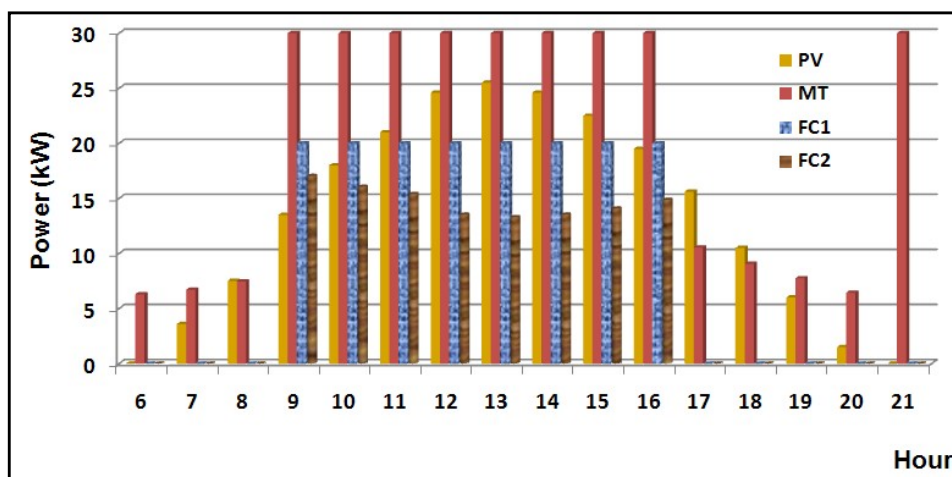
را نیز در برنامه قرار دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، الگوی شارژ و دشارژ خودروها با الگوی تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی مطابقت دارد. نتایج شکل‌های ۱۰-۳، ۱۱-۳ و ۱۲-۳ در مرحله‌ی اول، یعنی روز قبل از بهره‌برداری ریزشبکه، مورد استفاده قرار می‌گیرند و هر سناریویی که در روز آینده رخ دهد روی این نتیجه‌ها تاثیری نخواهد داشت.



شکل ۱۱-۳. توان شارژ/دشارژ خودروها در دوره برنامه‌ریزی



شکل ۱۲-۳. میزان تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی



شکل ۳-۱۳. مقدار مورد انتظار تولید در روز آینده توسط DG ها

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، پاسخ‌های بهینه‌ی مرحله دوم نیز برای هر سناریو مشخص می‌شوند؛ اما برای تصمیم‌گیری باید منتظر بود تا مشخص گردد چه سناریویی در مرحله‌ی دوم رخ خواهد داد. بنابراین به تعداد سناریوهای موجود برای عدم قطعیت، جواب‌های بهینه‌ی مختلفی در دسترس خواهد بود. با توجه به احتمال رخداد سناریوهای مختلف، شکل ۳-۱۳ تولید مورد انتظار مولدها را برای روز آینده نشان می‌دهد.

طبق این شکل، هر سه مولد قابل توزیع (MT، FC1 و FC2) در ساعات میانی روز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. مولدهای MT و FC1 در ساعات اوج قیمت برق با حداکثر ظرفیت خود کار می‌کنند، اما مولد FC2 با توجه به قیمت پیشنهادی بالاتر نسبت به دو مولد دیگر، بطور میانگین با ۷۰٪ ظرفیت خود کار خواهد کرد. 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. همچنین در ساعات ۶ الی ۹ و ۱۷ الی ۲۰، مولد MT با حداقل خروجی خود کار می‌کند. با توجه به شکل ۳-۱۰ مشخص است که بهره‌برداری از مولد MT در ساعات مذکور به دلیل وجود عدم قطعیت در تولید سیستم فتوولتائیک می‌باشد.

طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، با اعمال برنامه‌ریزی پیشنهادی، هزینه‌ی مورد انتظار مدیریت انرژی در این سیستم چیزی در حدود ۱۰۵ دلار خواهد بود.

۳-۴ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این فصل از رساله به بحث مدیریت انرژی در ریزشبکه شامل خودروهای الکتریکی پرداخته شد. با توجه به اهمیت خودروهای الکتریکی در شبکه‌های آینده، در ابتدا برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی به تنهایی مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور روابط حاکم بر انرژی خودروهای الکتریکی بیان شدند و در پایان با هدف حداقل‌سازی هزینه، برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ برای تعدادی خودرو در یک مجموعه مسکونی انجام گردید. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن بودند که تحت این شرایط، شارژ خودروها تا حد امکان به زمان‌هایی منتقل می‌شود که قیمت برق کمتر است. همچنین در ساعاتی که قیمت برق بیشتر است، این انگیزه وجود دارد تا انرژی موجود در باتری خودروها به شبکه تحویل داده شود.

در ادامه‌ی فصل، به مطالعه‌ی مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ای پرداخته شد که در آن منابع تولید پراکنده سوخت فسیلی، پنل‌های فتوولتاییک، بار مصرفی و همچنین خودروهای الکتریکی با قابلیت V2G وجود داشتند. با توجه به استفاده از منابع تجدیدپذیر، عدم قطعیت موجود در تولید فتوولتاییک نیز در برنامه‌ریزی انرژی لحاظ گردید. بدین منظور یک برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای پیشنهاد شد که در آن متغیرهای تصمیم‌گیری به دو مرحله‌ی زمانی تقسیم‌بندی شدند. در این مطالعه، بهره‌بردار ریزشبکه برنامه‌ریزی انرژی را برای خرید (فروش) انرژی از (به) بازار روز آینده می‌دهد. از آنجا که قیمت در بازار انرژی از روز قبل مشخص می‌شود، فرض شد که سیستم مدیریت انرژی ریزشبکه به قیمت‌های بازار روز آینده دسترسی دارد و ریزشبکه نیاز الکتریکی خود را باید از روز قبل اعلام نماید. با توجه به ساختار مساله، مدیریت انرژی ریزشبکه به صورت یک برنامه‌ریزی تصادفی خطی مختلط با عدد صحیح نوشته شد و با در نظر گرفتن یک سیستم نمونه، نتایج

شبیه‌سازی مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که برنامه‌ریزی پیشنهادی قادر است تا عدم قطعیت‌های موجود در مرحله‌ی زمانی دوم را بر روی تصمیمات مرحله‌ی اول که در زمان فعلی اتخاذ می‌شوند، منعکس کند.

فصل چهارم:

برنامه ریزی تصادفی انرژی در ریزشکه شامل حامل های متعدد

انرژی باد در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و تولید

۴-۱ مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون مصرف انرژی و محدودیت منابع انرژی فسیلی و همچنین فرسوده شدن بسیاری از زیرساخت‌های موجود، روش‌هایی برای حل این چالش‌ها از سوی محققان ارائه شده است. برخی از این راه‌حل‌ها نیازی به تحول عظیم در سیستم کنونی ندارند و می‌توان با تغییر در بخشی از ساختارهای موجود، به اهداف موردنظر رسید. این پیشنهادات را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود [۱۰۳]: الف) استفاده‌ی موثرتر از زیرساخت‌های^۱ موجود و ب) بکارگیری فناوری‌های جدید در سیستم قدرت. در صورت تحقق این موارد، حامل‌های مختلف انرژی از لحاظ فنی و اقتصادی بیش از گذشته با یکدیگر گره خواهند خورد. به همین دلیل در این فصل، ابتدا به اهمیت مطالعه‌ی یکپارچه‌ی سیستم‌های انرژی پرداخته شده و همچنین مفهوم و مدل هاب انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس برنامه‌ریزی انرژی برای یک ریزشبه‌ارائه شده است. در برنامه‌ریزی پیشنهادی، از مدل هاب انرژی کمک گرفته شده است و این امکان وجود دارد تا بارهای مختلف از طریق این واحدها تامین شوند. در این برنامه‌ریزی، عدم قطعیت‌های مربوط به بار و تولید فتوولتاییک در نظر گرفته شده و به منظور لحاظ نمودن این عدم قطعیت‌ها، از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای استفاده شده است.

۴-۲ اهمیت یکپارچه‌سازی سیستم‌های انرژی^۲

در سیستم‌های انرژی کنونی، برنامه‌ریزی توسعه و همچنین بهره‌برداری از حامل‌های انرژی^۱ مانند برق و گاز طبیعی، در بیشتر مواقع به صورت مستقل انجام می‌شود. یکی از راه‌های موثر برای

^۱ Energy infrastructure

^۲ Energy systems integration

این که بتوان بخش زیادی از توسعه‌ی شبکه‌های انرژی را به تاخیر انداخت، این است که از زیرساخت‌های موجود به بهترین شکل استفاده شود. برای این کار لازم است تا سیستم انرژی در افق برنامه‌ریزی و بهره‌برداری، به صورت یکپارچه در نظر گرفته شود. منظور از یکپارچه نمودن زیر ساخت‌ها، این است که انرژی بتواند بین آن‌ها مبادله شود. البته باید به این موضوع توجه کرد که بوجود آمدن امکان تبادل انرژی بین زیرساخت‌های مختلف، نیاز به ابزارهای مناسبی دارد.

استفاده از فناوری‌های جدید، مانند سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت یا CHP، موجب افزایش انعطاف‌پذیری در استفاده از حامل‌های مختلف انرژی می‌شود. همچنین بکارگیری این فناوری‌ها، تنوع منابع تامین‌کننده را افزایش می‌دهد که یک سری نقاط قوت را در مقایسه با سیستم سنتی به وجود می‌آورد. تحت این شرایط، بین انرژی‌های مربوطه یک تزویج ایجاد خواهد شد که کل سیستم انرژی را می‌تواند از لحاظ فنی و اقتصادی تحت تاثیر قرار دهد [۱۰۴]. این موضوع سبب می‌گردد تا بررسی همزمان حامل‌های مختلف انرژی اهمیت بیشتری پیدا کند.

در حالت کلی، حامل‌های مختلف انرژی مانند برق و گاز طبیعی، نیازهای مختلف مصرف کنندگان را از طریق زیرساخت‌های مجزا تامین می‌نمایند. بدیهی است که هر یک از حامل‌های انرژی دارای یک سری مشخصه‌های مطلوب می‌باشد که این امر می‌تواند انگیزه‌ی کافی را برای همکاری میان زیرساخت‌های مختلف انرژی به وجود آورد. به عنوان مثال؛ گاز طبیعی با هزینه‌ی نه چندان زیاد می‌تواند ذخیره گردد و یا انرژی الکتریکی را در فواصل طولانی با تلفات نسبتاً کمی می‌توان منتقل نمود.

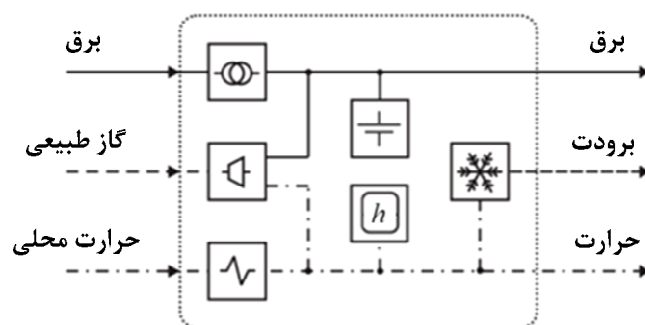
با توجه به موارد ذکر شده در بالا، این نیاز احساس شد تا مفهومی معرفی گردد که قادر است کار تبدیل، انتقال و ذخیره‌ی فرم‌های مختلف انرژی را در یک واحد مجزا انجام دهد. چنین واحدی در اصطلاح هاب انرژی نامیده می‌شود که استفاده از آن می‌تواند در مدیریت شبکه‌ی انرژی بسیار سودمند باشد. به منظور بهره‌گیری از هاب انرژی در بهینه‌سازی‌های مرتبط با شبکه‌ی انرژی، باید یک

^۱ Energy carriers

مدل‌سازی مناسب برای این واحدها ارائه شود. از آنجا که هاب انرژی از یک طرف با زیرساخت‌های انرژی و از طرف دیگر با بارهای مصرفی در ارتباط می‌باشد، باید رابطه‌ی بین ورودی و خروجی این واحد به طور مناسبی مدل گردد. بدین منظور نیاز است تا در ابتدا هر یک از عناصر داخلی هاب‌ها مدل شوند و سپس یک رابطه‌ی کلی برای آن معرفی شود.

امکان تبادل توان بین چندین حامل انرژی در مقایسه با حالتی که حامل‌های انرژی به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شوند، یک سری مزایا را برای سیستم انرژی به همراه خواهد داشت. از مهم‌ترین این موارد می‌توان به افزایش قابلیت اطمینان و همچنین افزایش انعطاف‌پذیری تامین بارها اشاره نمود. تحت این شرایط، برای تامین بارها در سمت خروجی، حامل‌های متعددی در سمت ورودی وجود دارند. این موضوع باعث می‌شود تا در حالت کلی دسترس پذیری به انرژی افزایش پیدا کند و وابستگی بار به یک زیر ساخت مشخص کمتر شود. همچنین مسیرهای اضافی^۱ درون هاب موجب می‌شوند تا درجه آزادی مشخصی برای تامین بار بوجود بیاید.

برای مثال؛ بار الکتریکی در شکل ۴-۱ می‌تواند از ورودی مربوط به حامل انرژی الکتریکی تغذیه شود و یا این امکان وجود دارد تا بخشی از توان مورد نیاز بار از طریق مسیرهای دیگر تامین گردد.



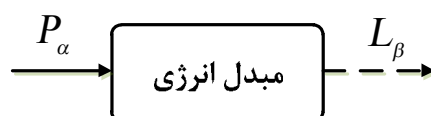
شکل ۴-۱. یک نمونه هاب انرژی متصل به شبکه‌های الکتریکی، حرارتی و گاز طبیعی

^۱ Redundant path

۳-۴ مدل سازی هاب انرژی

مراجع [۷۵]-[۷۹] مدل سازی هاب انرژی را به طور کامل مورد بررسی قرار داده اند که در این بخش از آن ها استفاده شده است. مبنای مدل سازی در این مراجع، ارتباط بین ورودی و خروجی عناصر با تکیه بر راندمان عناصر در حالت ماندگار بوده است. مبدل های انرژی و ذخیره کننده ها، مهم ترین اجزای هاب انرژی به شمار می روند.

مبدل انرژی می تواند یک نوع مشخص از حامل انرژی را به حاملی با شکل دیگر تبدیل کند و یا این که کیفیت و یا کمیت آن را تحت تاثیر قرار بدهد. در حالت کلی یک مبدل می تواند دارای چند ورودی و چند خروجی باشد. شکل ۲-۴ یک مبدل انرژی با یک ورودی و یک خروجی را به صورت شماتیک نمایش می دهد.



شکل ۲-۴. مبدل انرژی تک ورودی و تک خروجی

در این شکل، مشاهده می شود که جریان های ورودی و خروجی توسط مبدل انرژی به یکدیگر وابسته می شوند. در مدل هاب انرژی معمولاً از راندمان^۱ عناصر به عنوان مشخصه اصلی آن ها استفاده می شود.

برای یک مبدل انرژی با یک ورودی و یک خروجی که حامل ورودی از جنس α را در سمت خروجی به فرم β تبدیل می کند می توان نوشت [۱۰۴]:

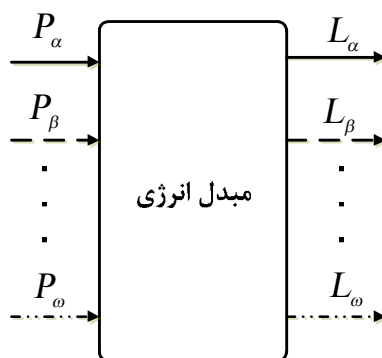
$$L_{\beta} = \gamma_{\alpha\beta} P_{\alpha} \quad (۱-۴)$$

که در این رابطه P_{α} ، L_{β} توان های ورودی و خروجی در حالت ماندگار هستند. $\gamma_{\alpha\beta}$ نیز ضریب تزویج^۲ است که نشان می دهد میزان تزویج بین ورودی و خروجی چقدر است.

^۱ Efficiency

^۲ Coupling factor

همانطور که اشاره شد، مبدل و یا ترکیبی از چندین مبدل می‌تواند دارای چندین ورودی و خروجی باشد. شکل ۳-۴ شماتیک یک مبدل انرژی چندورودی و چندخروجی را نمایش می‌دهد که حامل‌های مختلف انرژی را در سمت ورودی دریافت کرده و بارهای مختلف را در سمت خروجی تامین می‌نماید. اگر تمام ورودی‌ها $(P_\alpha, P_\beta, \dots, P_\omega)$ و خروجی‌ها $(L_\alpha, L_\beta, \dots, L_\omega)$ را به ترتیب در بردارهای P و L قرار دهیم، تبدیل انرژی توسط مبدل را می‌توان به صورت ماتریسی بیان کرد.



شکل ۳-۴. مبدل با چند ورودی و چند خروجی

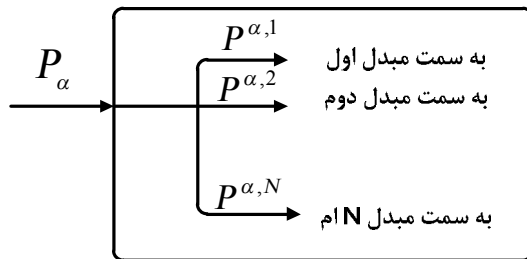
$$L = [\Gamma] P \quad , \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{\alpha\alpha} & \gamma_{\alpha\beta} & \cdots & \gamma_{\alpha\omega} \\ \gamma_{\beta\alpha} & \gamma_{\beta\beta} & \cdots & \gamma_{\beta\omega} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{\omega\alpha} & \gamma_{\omega\beta} & \cdots & \gamma_{\omega\omega} \end{bmatrix} \quad (۲-۴)$$

که ماتریس Γ به عنوان ماتریس توزیع^۱ شناخته می‌شود

اگر انرژی ورودی از جنس α مطابق شکل ۴-۴ بین چندین مبدل تقسیم شود، ضریب توزیع $\theta^{\alpha,k}$ مشخص می‌کند که چقدر از حامل انرژی α به مبدل k وارد می‌شود.

$$P^{\alpha,k} = \theta^{\alpha,k} P_\alpha \quad (۳-۴)$$

^۱ Coupling matrix



شکل ۴-۴. توزیع انرژی بین چندین مبدا

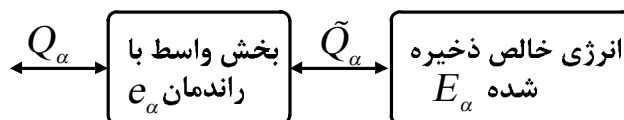
از آنجایی که هر یک از انشعابات فقط بخشی از کل انرژی α را انتقال می‌دهد، تمامی ضرایب توزیع کوچکتر یا مساوی یک هستند. همچنین مجموع همه‌ی ضرایب توزیع مربوط به یک نقطه‌ی انشعاب برابر با یک خواهد بود.

$$0 \leq \theta^{\alpha,k} \leq 1 \quad (۴-۴)$$

$$\sum_{k \in C_\alpha} \theta^{\alpha,k} = 1 \quad \forall \alpha \in \mathcal{E} \quad (۵-۴)$$

مدل هاب انرژی با در نظر گرفتن عناصر ذخیره‌کننده

یک ذخیره‌کننده دارای تلفات را می‌توان به صورت یک ذخیره‌کننده‌ی ایده‌آل و یک بخش واسط تلفاتی در نظر گرفت. بخش واسط شبیه به یک مبدا انرژی عمل می‌کند که می‌تواند حامل انرژی را به نوع دیگری تبدیل کند و سپس این انرژی در قسمت داخلی ذخیره شود.



شکل ۵-۴. مدل تجهیز ذخیره‌کننده

با توجه به شکل ۵-۴، توانی که بطور مفید وارد ذخیره‌کننده می‌شود را می‌توان به صورت رابطه‌ی

(۶-۴) نوشت:

$$\bar{Q}_\alpha = e_\alpha Q_\alpha \quad (6-4)$$

که Q_α توان تبدالی با ذخیره‌کننده است و همچنین e_α راندمان بخش واسط می‌باشد که مقدار آن بستگی به جهت شارش توان دارد. در ذخیره‌سازها جهت شارش توان با توجه به وضعیت شارژ یا دشارژ متفاوت می‌باشد. مقدار e_α طبق رابطه‌ی (۷-۴) می‌تواند بیان می‌گردد [۱۰۳].

$$e_\alpha = \begin{cases} e_\alpha^+ & \text{if } Q_\alpha \geq 0 \\ 1/e_\alpha^- & \text{else} \end{cases} \quad (7-4)$$

که e_α^+, e_α^- به ترتیب راندمان‌های شارژ و دشارژ هستند.

میزان انرژی ذخیره شده در یک ذخیره‌کننده پس از دوره زمانی مشخص T ، برابر با مجموع مقدار ذخیره‌ی اولیه و انتگرال توان ورودی به ذخیره‌کننده در طی مدت زمان T می‌باشد.

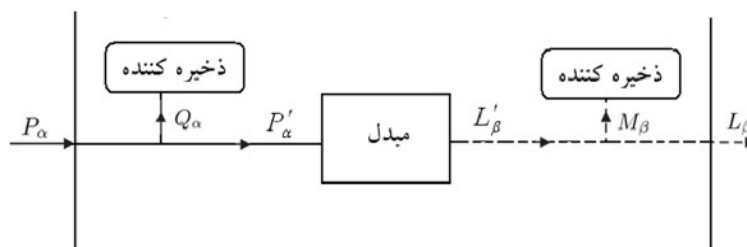
$$E_{\alpha,T} = E_{\alpha,t_0} + \int_{t_0}^T \bar{Q}_{\alpha,t} dt \quad (8-4)$$

هاب انرژی ممکن است دارای چندین ذخیره‌کننده باشد که در حالت کلی می‌توانند در سمت

ورودی، خروجی و یا بین مبدل‌های ارتباط دهنده‌ی ورودی و خروجی قرار بگیرند که این امر در شکل

۶-۴ نشان داده شده است. مستقل از این که ذخیره‌کننده‌ها در کدام سمت قرار گرفته باشند، می

توان معادلات ذخیره‌کننده‌ها را به صورت معادل در یک سمت (ورودی یا خروجی) در نظر گرفت.



شکل ۶-۴. تجهیز ذخیره‌کننده درون هاب

با اضافه شدن ذخیره‌ساز، رابطه‌ی میان ورودی و خروجی هاب به صورت زیر خواهد بود.

$$L + M = \Gamma[P - Q] \quad (9-4)$$

در این روابط، ماتریس‌های Q و M به ترتیب بیانگر میزان توان ورودی به ذخیره‌کننده‌های سمت ورودی و خروجی هاب می‌باشد. تمامی تاثیرات عمل ذخیره‌سازی را می‌توان به صورت بردار توان ذخیره‌ای معادل M^{eq} در نظر گرفت.

$$M^{eq} = \Gamma Q + M = S\dot{E} \quad (10-4)$$

که ماتریس S ، ماتریس تزویج ذخیره است و نشان می‌دهد تغییرات انرژی ذخیره‌شده (\dot{E}) چه مقدار روی جریان خروجی هاب تاثیر می‌گذارد.

رابطه‌ی کلی بین ورودی و خروجی هاب با وجود ذخیره انرژی را می‌توان مانند معادله (4-11) بیان نمود.

$$L = \Gamma[P - Q] - M = \Gamma P - S\dot{E} = \begin{bmatrix} \Gamma & -S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \dot{E} \end{bmatrix} \quad (11-4)$$

۴-۴ اهمیت و اهداف برنامه‌ریزی یکپارچه در ریزشبکه‌ی انرژی

نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه از قبیل CHPها، می‌تواند بهره‌برداری سیستم قدرت را از لحاظ فنی و اقتصادی تحت تاثیر قرار دهد. این امر به دلیل تبادل توان بین حامل‌های مختلف انرژی می‌باشد. بکارگیری این قبیل واحدهای تولید پراکنده و ذخیره‌سازها توسط مشترکان، عاملی کلیدی در مسیر حرکت به سمت سیستم‌های انرژی هوشمند و انعطاف‌پذیر می‌باشد ([۱۰۳] و [۷۶]). از جایی که مولدهای با فناوری جدید و راندمان بالا در شبکه‌های هوشمند نفوذ زیادی خواهند داشت، اهمیت بهره‌برداری و برنامه‌ریزی حامل‌های مختلف انرژی به صورت یکپارچه بیش‌تر مشخص خواهد شد. به طور کلی، ترکیب شدن زیرساخت‌های مختلف انرژی می‌تواند موجب بهبود قابلیت اطمینان، راندمان و انعطاف‌پذیری در تامین بارها گردد ([۸۱] و [۷۶]).

در سیستم‌های انرژی آینده انتظار می‌رود که منابع و زیرساخت‌های مختلف انرژی چه در فاز برنامه‌ریزی توسعه و چه در فاز بهره‌برداری، به طور همزمان مورد توجه قرار بگیرند. به همین دلیل طی سالیان اخیر، پژوهش‌های مختلفی در رابطه با بهره‌برداری و برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های انرژی با حامل‌های متعدد انجام شده است. این فصل از رساله نیز قصد دارد تا یک برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای خطی مختلط با عدد صحیح را برای مدیریت انرژی در سیستم‌های انرژی با حامل‌های متعدد ارائه کند که در آن عدم قطعیت‌های مربوط به بار و تولید منابع تجدیدپذیر لحاظ شده‌اند. بدین منظور از مفهوم هاب انرژی برای مدل‌سازی ریزشبکه استفاده شده است.

در برنامه‌ریزی پیشنهادی، حداقل‌سازی هزینه‌ی کل هاب انرژی به عنوان هدف در نظر گرفته شده که رسیدن به این هدف از طریق برنامه‌ریزی بهینه برای ورود/خروج مولدها، مقدار توان تولیدی مولدها، شارژ/دشارژ ذخیره‌کننده‌ها و تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی حاصل خواهد شد. بهره‌بردار هاب انرژی (EHO¹) چندین منبع تولید پراکنده در اختیار دارد و این امکان را دارد تا از زیرساخت‌های برق و گاز طبیعی و همچنین منبع تجدیدپذیر خورشیدی استفاده نماید. به طور کلی اهداف این بخش عبارتند از:

- برنامه‌ریزی یکپارچه سیستم انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و تولید.
- استفاده از مدل هاب انرژی به عنوان ریزشبکه‌ی انرژی به منظور ساده نمودن ارتباط بین حامل‌های انرژی مختلف.
- ارائه‌ی برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای برنامه‌ریزی هاب انرژی و استفاده از برنامه‌ریزی توسعه‌یافته (EMP) برای حل مساله.

¹ Energy hub operator

۴-۵ ساختار ریاضی مساله

در این مطالعه از روابط حاکم بر هاب انرژی برای مدل سازی ریزشبکه‌ی انرژی استفاده شده است. ریزشبکه‌ی مورد مطالعه به زیرساخت‌های الکتریکی و گاز طبیعی متصل است. همچنین فرض شده است که سیستم مدیریت انرژی، به قیمت بازار روز آینده دسترسی دارد [۶۳]. کل بارهای مصرفی موجود در ناحیه باید توسط هاب انرژی تامین شوند که EHO می‌تواند انرژی مورد نیاز را مستقیماً از شبکه خریداری کند و یا اینکه توسط منابع محلی تولید نماید.

۴-۵-۱ هاب انرژی

همانطور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، رابطه بین ورودی و خروجی هاب انرژی

عبارتست از:

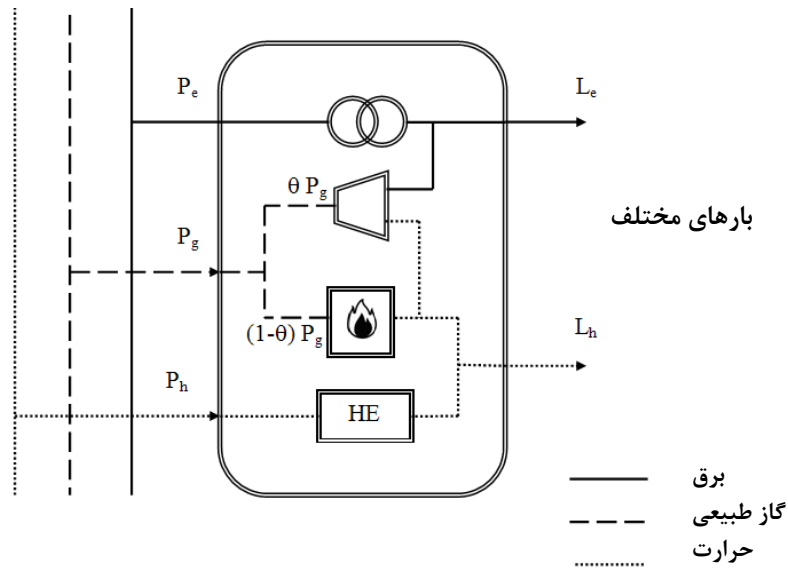
$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_\alpha \\ L_\beta \\ \vdots \\ L_\omega \end{bmatrix}}_L = \underbrace{\begin{bmatrix} \gamma_{\alpha\alpha} & \gamma_{\alpha\beta} & \cdots & \gamma_{\alpha\omega} \\ \gamma_{\beta\alpha} & \gamma_{\beta\beta} & \cdots & \gamma_{\beta\omega} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{\omega\alpha} & \gamma_{\omega\beta} & \cdots & \gamma_{\omega\omega} \end{bmatrix}}_\Gamma \underbrace{\begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \\ \vdots \\ P_\omega \end{bmatrix}}_P \quad (12-4)$$

اگر درصدی از کل ورودی از جنس α که به مبدل k ام وارد می‌شود با $\theta^{\alpha,k}$ نمایش داده شود، ضرایب تزویج به صورت (۱۳-۴) می‌تواند تعریف می‌شود.

$$\gamma_{\alpha\beta} = \sum_k \theta^{\alpha,k} \eta_{\alpha\beta}^k \quad (13-4)$$

که $\eta_{\alpha\beta}^k$ راندمان انرژی بین ورودی و خروجی مبدل k ام می‌باشد. بطور مثال، رابطه‌ی بین ورودی و خروجی برای ساختار نشان داده شده در شکل ۴-۷ مطابق زیر می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{ee}^T & \theta \eta_{ge}^{chp} & 0 \\ 0 & \underbrace{\theta \eta_{gh}^{chp} + (1-\theta) \eta_{gh}^F}_{\gamma_{gh}} & \eta_{hh}^{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e \\ P_g \\ P_h \end{bmatrix} \quad (14-4)$$



شکل ۴-۷. یک نمونه هاب انرژی

۴-۵-۲ محدودیت‌های هاب انرژی

علاوه بر رابطه‌ی کلی میان ورودی و خروجی، چندین قید نیز وجود دارند که مربوط به محدودیت‌های ورودی سیستم می‌باشند. با توجه به محدودیت‌های سیستم، توان از جنس α در سمت ورودی توسط یک مقدار حداقل و حداکثر محدود می‌شود.

$$P_{\alpha}^{\min} \leq P_{\alpha,t} \leq P_{\alpha}^{\max}, \quad \alpha \in \Omega \quad (15-4)$$

که Ω مجموعه حامل‌های انرژی می‌باشد. بطور مشابه محدودیت‌هایی برای تمام توان‌های ورودی وجود دارد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که بردار ورودی P دارای محدودیت حداقل و حداکثری می‌باشد.

$$P^{\min} \leq P_t \leq P^{\max} \quad (16-4)$$

هر یک از تجهیزات داخلی هاب نیز دارای محدودیت بوده و همچنین وضعیت در مدار بودن این تجهیزات ممکن است با یکدیگر متفاوت باشند. به عنوان نمونه، توان ورودی به مبدل k ام باید در یک محدوده‌ی مجاز قرار داشته باشد و EHO موظف است سیستم را بگونه‌ای مورد بهره‌برداری قرار

دهد که این قید رعایت شود. همچنین این امکان وجود دارد تا مبدل‌هایی مانند DGها، در برخی مواقع از مدار خارج شوند. این موضوع می‌تواند به کمک متغیرهای باینری w مدل شود.

$$w_{k,t} \cdot p_{\min}^{\alpha,k} \leq p_t^{\alpha,k} = \theta^{\alpha,k} P_t^{\alpha} \leq w_{k,t} \cdot p_{\max}^{\alpha,k} \quad (17-4)$$

که حروف و علائم استفاده شده در این معادله طبق زیر می‌باشند:

$p_t^{\alpha,k}$: مقدار توان از جنس α ورودی به مبدل k ام در زمان t

$p_{\min}^{\alpha,k}$ و $p_{\max}^{\alpha,k}$: به ترتیب مقدار حداکثر و حداقل توان ورودی به مبدل k ام

$w_{k,t}$: متغیر باینری مربوط به روشن (=1) و خاموش (=0) بودن مبدل k ام در زمان t .

بنابراین همانگونه که در (4-18) مشاهده می‌شود، متغیرهای باینری روشن/خاموش در ضرایب مربوط به ماتریس توزیع ظاهر می‌شوند.

$$\gamma_{\alpha\beta} = \sum_k w_k \cdot \theta^{\alpha,k} \cdot \eta_{\alpha\beta}^k \quad (18-4)$$

۴-۵-۳ ذخیره‌کننده‌ها

ذخیره‌کننده‌های انرژی مانند باتری‌ها، نقش بسیار مهمی را در مطالعات مدیریت انرژی ایفا می‌کنند. با وجود این عناصر در هاب انرژی، علاوه بر یافتن توان ورودی بهینه و ضرایب توزیع، توان‌های شارژ و دشارژ انرژی مربوط به ذخیره‌سازها نیز مورد توجه خواهند بود. به عنوان مثال در یک ریزشبکه، پارکینگ خودروهای الکتریکی را می‌توان به عنوان یک باتری بزرگ فرض نمود که همواره به شبکه متصل است؛ در حالی که ظرفیت آن در هر زمان تغییر می‌کند. روابط مربوط به انرژی ذخیره شده در باتری خودروها در فصل سوم بیان شدند. این روابط برای انواع دیگر ذخیره‌سازها مانند ذخیره‌سازهای حرارتی نیز قابل تعمیم می‌باشند.

اگر از تلفات انرژی در حالت آماده به کار صرف نظر شود، مقدار انرژی ذخیره شده در ذخیره‌کننده در زمان t از رابطه (4-19) محاسبه می‌شود. همچنین این عناصر دارای یک سری محدودیت‌های مرتبط با توان و انرژی می‌باشند که در روابط (4-20) تا (4-24) آورده شده‌اند.

$$E_t = \begin{cases} E_{t-1} + \left[\eta_{ch} \times q_t^{ch} \right] \times \Delta t & \text{حالت شارژ} \\ E_{t-1} - \left[\frac{1}{\eta_{dch}} q_t^{dch} \right] \times \Delta t & \text{حالت دشارژ} \end{cases} \quad (19-4)$$

$$E^{\min} \leq E_t \leq E^{\max} \quad \forall t \quad (20-4)$$

$$0 \leq q_t^{ch} \leq u_t \times q_{\max}^{ch} \quad (21-4)$$

$$0 \leq q_t^{dch} \leq v_t q_{\max}^{dch} \quad (22-4)$$

$$u_t + v_t \leq 1 \quad (23-4)$$

$$q_t = q_t^{ch} + q_t^{dch} \quad (24-4)$$

که در این روابط:

q_t^{ch}, q_t^{dch} : به ترتیب توان شارژ و دشارژ در زمان t

$q_{\max}^{ch}, q_{\max}^{dch}$: به ترتیب حداکثر و حداقل توان شارژ

E_t : انرژی ذخیره شده در زمان t

E^{\min}, E^{\max} : به ترتیب حداکثر و حداقل سطح انرژی مجاز ذخیره‌کننده

u_t : متغیر باینری مربوط به شارژ شدن (=1) در زمان t

v_t : متغیر باینری مربوط به شارژ شدن (=1) در زمان t و

η^{ch}, η^{dch} به ترتیب راندمان شارژ و راندمان دشارژ می‌باشند.

۴-۵-۴ غیرخطی شدن مساله با وجود ضرایب توزیع

به دلیل وجود ضرایب توزیع در ماتریس تزویج، معادله (۴-۱۲) غیرخطی می‌باشد. برای دوری

کردن از غیرخطی شدن مساله، برای حامل‌هایی که به مبدل‌های مختلف منشعب می‌شوند، به طور

فرضی تعدادی ورودی اضافی در نظر گرفته می‌شود. سپس این ورودی‌های فرضی در برنامه‌ریزی به

عنوان یک ورودی مجزا در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان مثال ورودی گاز طبیعی در شکل ۴-۷

می‌تواند توسط دو ورودی مجزای p_{g1} و p_{g2} مدل شود. در این صورت معادله‌ی

(۱۴-۴) می تواند بصورت زیر بازنویسی شود:

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{ee}^T & \eta_{ge}^{chp} & 0 & 0 \\ 0 & \eta_{gh}^{chp} & \eta_{gh}^F & \eta_{hh}^{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e \\ P_{g1} \\ P_{g2} \\ P_h \end{bmatrix} \left. \vphantom{\begin{bmatrix} P_e \\ P_{g1} \\ P_{g2} \\ P_h \end{bmatrix}} \right\} P_g \quad (25-4)$$

در حقیقت p_{g1} و p_{g2} از یک حامل انرژی منشعب می شوند. بنابراین می توان نوشت:

$$p_{g1} + p_{g2} = P_g \quad (26-4)$$

$$P_g^{\min} \leq p_{g1} + p_{g2} \leq P_g^{\max} \quad (27-4)$$

با این فرض، مساله خطی می شود. تحت این شرایط برای یافتن مقادیر بهینه‌ی مربوط به ضرایب توزیع می توان از مقادیر بهینه‌ی ورودی‌های فرضی استفاده کرد. در حالت کلی بعد از حل مساله، مقادیر بهینه‌ی ضرایب توزیع می توانند بصورت زیر محاسبه شوند:

$$\theta^{\alpha,k} = \frac{p^{\alpha,k}}{P^\alpha} = \frac{p^{\alpha,k}}{\sum_k p^{\alpha,k}} \quad (28-4)$$

به طور نمونه، ضرایب توزیع مربوط به شکل ۵-۸ مانند (۲۹-۴) می باشد.

$$\theta_1 = \theta^{g,CHP} = \frac{p_{g1}}{p_{g1} + p_{g2}}, \quad \theta_2 = \theta^{g,F} = 1 - \theta^{g,CHP} = \frac{p_{g2}}{p_{g1} + p_{g2}} \quad (29-4)$$

۵-۵-۴ MDT و MUT در مساله‌ی ورود/خروج واحدها از مدار

یک واحد حرارتی وقتی که وارد مدار می شود و یا وقتی که از مدار خارج می شود، باید قیود

MUT و MDT را برآورده نماید. این قیود می توانند به صورت زیر ظاهر شوند ([۶۳], [۶۴]):

$$\left[t_{k,t-1}^{on} - MUT_k \right] \times \left[w_{k,t-1} - w_{k,t} \right] \geq 0 \quad ; \forall t \quad (30-4)$$

$$\left[t_{k,t-1}^{off} - MDT_k \right] \times \left[w_{k,t} - w_{k,t-1} \right] \geq 0 \quad ; \forall t \quad (31-4)$$

که حروف و علائم استفاده شده در این روابط طبق زیر می باشند:

t_k^{on} : تعداد ساعاتی که k امین مولد بطور پیوسته روشن بوده است

t_k^{off} : تعداد ساعاتی که k امین مولد بطور پیوسته خاموش بوده است

$w_{k,t}$: متغیر باینری مربوط به روشن بودن (=1) مولد k ام در زمان t

MUT_k : حداقل زمان مجاز برای خروج مجدد مولد k ام پس از ورود به مدار

MDT_k : حداقل زمان مجاز برای ورود مجدد مولد k ام پس از خروج از مدار.

قیود (۳۰-۴) و (۳۱-۴) غیرخطی هستند و می‌توانند با معادل خطی‌شان جایگزین گردند. با خطی‌سازی مساله می‌توان سرعت همگرایی مساله را افزایش داد و همچنین به بهینه‌ی سراسری دست یافت.

مرجع [۱۰۵] خطی‌کردن مساله‌ی ورود واحدهای تولیدی به مدار را مورد بررسی قرار داده

است. در این رساله برای خطی‌سازی قیود MUT و MDT از روش پیشنهادی این مرجع استفاده شده است. با توجه به این موضوع، معادله‌ی (۳۰-۴) را می‌توان بصورت زیر بازنویسی نمود.

$$\sum_{t=1}^{L_t} [1 - w_{k,t}] = 0 \quad (۳۲-۴)$$

$$\sum_{i=t}^{t+MUT_k-1} w_{k,i} \geq MUT_k \cdot v_{k,t}^{on} \quad \forall t = L_t + 1, \dots, T - MUT_k + 1 \quad (۳۳-۴)$$

$$\sum_{i=t}^T [w_{k,i} - v_{k,t}] \geq 0 \quad ; \forall t = T - MUT_k + 2, \dots, T \quad (۳۴-۴)$$

$$L_t = \text{Min} [T, (MUT_k - t_{k,t0}^{on}) \cdot w_{k,t0}] \quad (۳۵-۴)$$

همچنین معادله‌ی (۳۱-۴) نیز می‌تواند بصورت روابط (۳۶-۴) تا (۳۹-۴) بازنویسی گردد.

$$\sum_{t=1}^{M_t} w_{k,t} = 0 \quad (36-4)$$

$$\sum_{i=t}^{t+MDT_k-1} [1-w_{k,i}] \geq MDT_k \cdot v_{k,t}^{off} \quad \forall t = M_t + 1, \dots, T - MDT_k + 1 \quad (37-4)$$

$$\sum_{i=t}^T [1-w_{k,i} - v_{k,t}^{off}] \geq 0 \quad ; \forall t = T - MDT_k + 2, \dots, T \quad (38-4)$$

$$M_k = \text{Min} [T, (MDT_k - t_{k,t0}^{off}) \cdot (1 - w_{k,t0})] \quad (39-4)$$

که در این روابط :

w_k : متغیر باینری (اگر واحد k وارد مدار باشد = ۱ و خارج از مدار = ۰)

MDT_k / MUT_k : به ترتیب حداقل زمان روشن / خاموش بودن واحد k هنگام ورود/خروج از مدار

t : دوره‌ی زمانی

T : کل ساعات دوره‌ی برنامه‌ریزی

$v_{k,t}^{on}$: متغیر باینری (هنگام روشن شدن واحد در زمان t مقدار آن = ۱ و در بقیه‌ی زمان‌ها = ۰)

$v_{k,t}^{off}$: متغیر باینری (هنگام خاموش شدن واحد در زمان t مقدار آن = ۱ و در بقیه‌ی زمان‌ها = ۰)

می‌باشند.

۴-۶ در نظر گرفتن عدم قطعیت

در این مطالعه عدم قطعیت بار و تولید فتوولتاییک در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر،

یکی از ورودی‌ها (تابش خورشید) و همچنین یکی از خروجی‌های (بار الکتریکی) مربوط به سیستم

انرژی که معادلات آن در بخش ۴-۵ بیان شدند، دارای عدم قطعیت هستند. همچنین فرض شده

است که این دو عدم قطعیت مستقل هستند. هرچند در حال حاضر روش‌های متعددی برای

پیش‌بینی این مقادیر مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما باز هم مقادیر پیش‌بینی شده بطور کامل با

مقادیر زمان واقعی برابر نخواهند بود. همانگونه که در مرجع [۵۶] تاکید شده است، پیش‌بینی تابش خورشید برای روز آینده می‌تواند همراه با عدم قطعیت‌های قابل توجهی همراه باشد.

۴-۶-۱ تولید سناریو

در حالت کلی، خطاهای ناشی از پیش‌بینی معمولاً به صورت یک توزیع احتمال، مانند توزیع نرمال، بیان می‌شوند. از جایی که در نظر گرفتن تمام حالات پیوسته‌ی توزیع احتمال شاید کاری زمان‌بر 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 [۴۸]. در این مطالعه به منظور لحاظ نمودن عدم قطعیت‌ها، مجموعه‌ای از توزیع احتمال گسسته برای بار و تولید فتوولتاییک در نظر گرفته شده است ([۱۰۶], [۶۹]).

$$\delta_{pV} = \{(P_{pv}^1, \rho_{pv}^1); (P_{pv}^2, \rho_{pv}^2); \dots; (P_{pv}^{Npv}, \rho_{pv}^{Npv})\} \quad (۴۰-۴)$$

$$\delta_L = \{(P_L^1, \rho_L^1); (P_L^2, \rho_L^2); \dots; (P_L^{NL}, \rho_L^{NL})\} \quad (۴۱-۴)$$

$$\sum_{j=1}^{NL} \rho_L^j = 1, \quad \sum_{j=1}^{Npv} \rho_{pv}^j = 1 \quad (۴۲-۴)$$

$$\sum_{s \in S} \rho_L \rho_{pv} = 1, \quad S = \delta_L \times \delta_{pV} \quad (۴۳-۴)$$

علائم و حروف به کار رفته در این روابط طبق زیر می‌باشند:

δ_{pV}, δ_L : به ترتیب توزیع احتمال گسسته‌ی مربوط به بار و فتوولتاییک

P_L^i, P_{pv}^i : به ترتیب توان تولیدی فتوولتاییک و توان مصرفی مربوط به شرایط i ام

ρ_L^i, ρ_{pv}^i : به ترتیب احتمال رخداد شرایط i ام برای فتوولتاییک و بار مصرفی

S : کل سناریوهای ممکن

همانطور که رابطه‌ی (۴۳-۴) نشان می‌دهد، مجموعه‌های (۴۰-۴) و (۴۱-۴) برای تولید سناریوها به کار گرفته شده‌اند.

۴-۶-۲ برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای

در این مطالعه برای لحاظ کردن عدم قطعیت در مدیریت انرژی ریزشبکه، برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. همانگونه که در فصل سوم هم توضیح داده شد، در مدل دومرحله‌ای برخی تصمیمات باید در مرحله زمانی اول اتخاذ گردند، یعنی قبل از این که اطلاعات نامطمئن در مورد آینده معلوم شود. تصمیمات مرحله‌ی دوم نیز تا زمان آشکار شدن عدم قطعیت‌ها به تعویق می‌افتند. تصمیمات مرحله‌ی دوم برای هر سناریو می‌توانند متفاوت باشند. شکل ۴-۸ فرایند تصمیم‌گیری مساله‌ی مورد مطالعه را توسط برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای نشان می‌دهد.

در این مساله، بهره‌بردار ریزشبکه وظیفه دارد تا حامل‌های انرژی، ضرایب توزیع، انرژی ذخیره شده، ورود منابع تولید به مدار و تبادل انرژی با شبکه‌ی بالادستی را مدیریت نماید؛ بطوری که هزینه‌ی مورد انتظار بهره‌برداری حداقل گردد. هزینه‌ی انرژی ($ECOST$) برای یک حامل انرژی مشخص α می‌تواند به صورت زیر محاسبه گردد:

$$ECOST_{\alpha,t} = \quad (4-44)$$

$$\left(\left[r_t \cdot \pi_{\alpha,t}^{grid,pur} + (1-r_t) \cdot \pi_{\alpha,t}^{grid,sb} \right] P_{\alpha,t} \right) \times \Delta t$$

$$r = \begin{cases} 1 & \text{if } P_{\alpha} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-45)$$

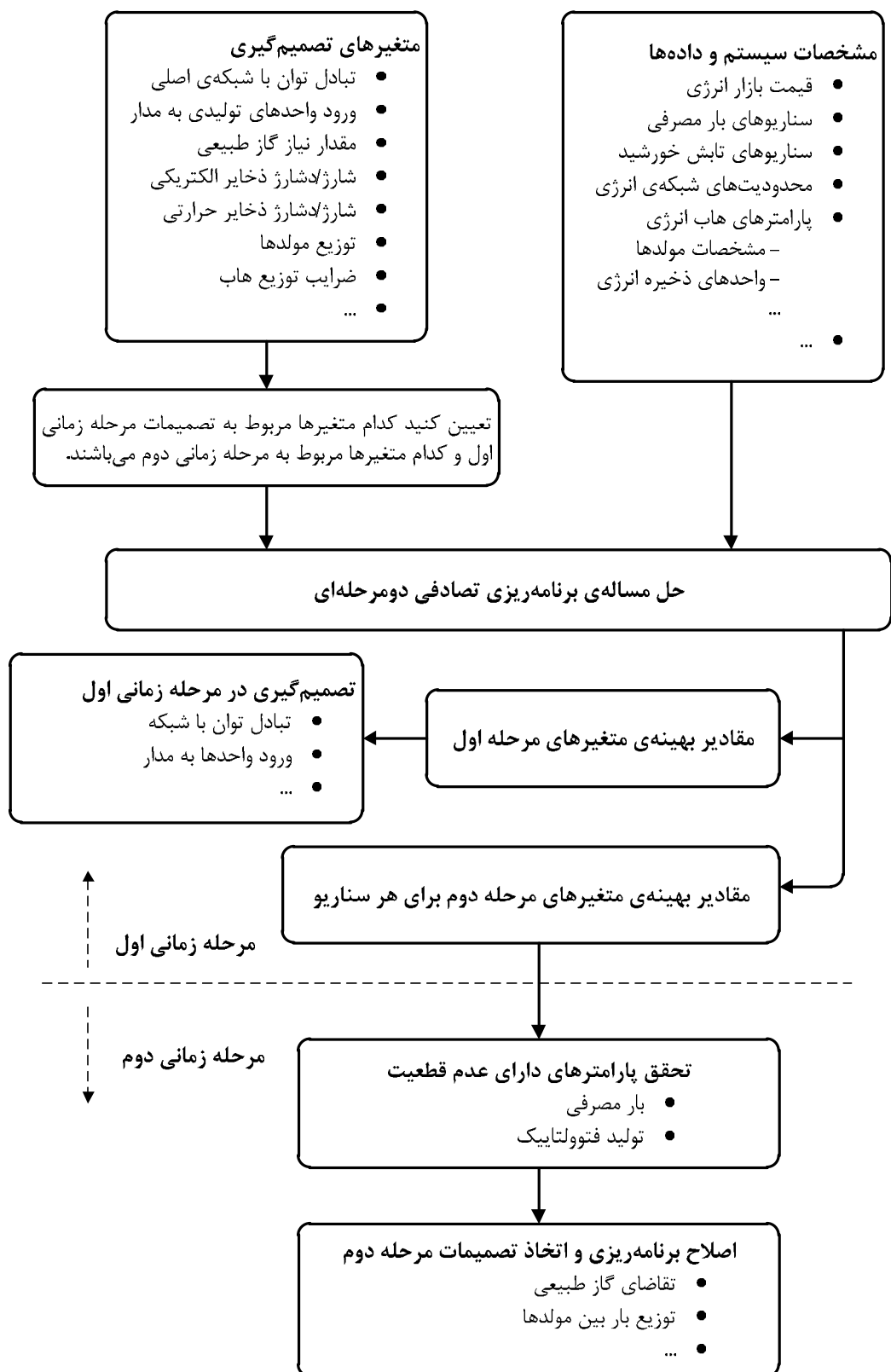
که علائم و حروف استفاده شده در این روابط مطابق زیر می‌باشند:

$\pi_{\alpha}^{grid,pur}$: قیمت خرید انرژی α از شبکه

$\pi_{\alpha}^{grid,sb}$: قیمت فروش انرژی α به شبکه

Δt : گام زمانی برنامه‌ریزی

r : متغیر باینری برای تعیین جهت تبادل انرژی (خرید = ۱ و فروش = ۰) انرژی با شبکه



شکل ۴-۸. فرایند تصمیم‌گیری با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای

به علت غیرخطی بودن P_{α} ، (۴۴-۴) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$P_{\alpha,t} = P_{\alpha,t}^{pur} - P_{\alpha,t}^{sb} \quad (۴۶-۴)$$

که $P_{\alpha,t}^{sb}$ و $P_{\alpha,t}^{pur}$ بیانگر میزان توان خریداری شده و فروخته شده به شبکه در زمان t می‌باشند.

بنابراین قید نامساوی (۱۵-۴) می‌تواند بصورت زیر بازنویسی گردد:

$$P_{\alpha,t}^{pur} \leq r_t P_{\max}^{grid} \quad (۴۷-۴)$$

$$P_{\alpha,t}^{sb} \leq (1-r_t) P_{\max}^{grid} \quad (۴۸-۴)$$

$$P_{\alpha,t}^{pur}, P_{\alpha,t}^{sb} \geq 0 \quad (۴۹-۴)$$

از آنجا که قیمت انرژی در بازار روز آینده ساعتی می‌باشد، گام زمانی یک ساعته برای

برنامه‌ریزی پیشنهادی در نظر گرفته شده است. با لحاظ کردن گام زمانی یک ساعته خواهیم داشت:

$$ECOST_{\alpha,t} = \pi_{\alpha,t}^{grid,pur} . P_{\alpha,t}^{pur} - \pi_{\alpha,t}^{grid,sb} . P_{\alpha,t}^{sb} \quad (۵۰-۴)$$

تابع هدف F شامل هزینه انرژی خریداری شده از شبکه و هزینه راه‌اندازی مولدها

می‌باشد که میزان درآمد حاصل از فروش انرژی مازاد به شبکه از آن کسر شده است.

$$F = \sum_{t \in T} \left[\sum_{\alpha \in \Omega} ECOST_{\alpha,t} + \sum_{k \in \Psi} C_{k,t}^{SU} \right] \quad (۵۱-۴)$$

در این رابطه، Ψ بیانگر مجموعه مبدل‌های انرژی می‌باشد و $C_{k,t}^{SU}$ هزینه راه‌اندازی مبدل k ام بوده

که بصورت (۵۲-۴) می‌تواند بیان شود [۶۳]. پارامتر SU_k بیانگر هزینه تحمیل شده به سیستم بابت

وارد شدن مولد k ام به مدار می‌باشد.

$$C_{k,t}^{SU} = [w_{k,t} - w_{k,t-1}] . SU_k \geq 0 \quad (۵۲-۴)$$

کل بار مصرفی باید توسط مجموع انرژی خریداری شده از شبکه، تولید محلی و همچنین

سیستم‌های ذخیره‌ساز تامین گردد (طبق روابط (۱۲-۴) و (۱۳-۴)). توان تبادلی با شبکه‌ی بالادست

دارای محدودیت بوده (طبق رابطه‌ی (۱۶-۴)) و همچنین هر یک از مبدل‌های انرژی نیز دارای

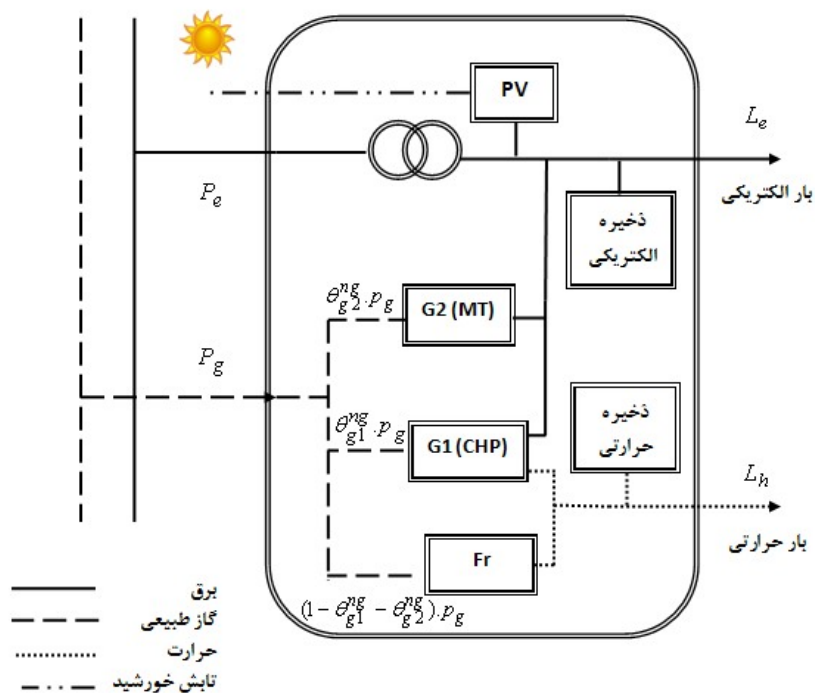
محدودیت تولید می‌باشد (طبق روابط (۱۷-۴) و (۲۱-۴)). به واسطه‌ی فرایند شارژ/دشارژ، میزان انرژی

ذخیره شده در ذخیره‌کننده‌ها تغییر می‌کند و با توجه به محدودیت‌های موجود ذخیره‌کننده، باید

میزان انرژی موجود در این تجهیزات در هر ساعت محاسبه گردد (طبق روابط (۴-۱۹) تا (۴-۲۴)). در این مطالعه، ریزشکبه‌ی انرژی شامل منبع فتوولتاییک می‌باشد. همانگونه که ارتباط بین ورودی (تابش خورشید) و خروجی (توان الکتریکی) فتوولتاییک در رابطه‌ی (۳-۳۲) آورده شد، این فناوری‌ها را می‌توان به عنوان یک مبدل انرژی مدل‌سازی نمود. در این مطالعه از EMP به منظور حل مسالهی برنامه‌ریزی تصادفی پیشنهادی استفاده شده که در محیط GAMS پیاده‌سازی شده است.

۴-۷ بررسی یک سیستم نمونه:

به منظور شبیه‌سازی روش پیشنهادی، یک هاب انرژی در ناحیه‌ی مسکونی در نظر گرفته شده است. همانگونه که در شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود، سیستم مورد مطالعه در سمت ورودی به زیرساخت‌های الکتریکی و گاز طبیعی متصل است و در سمت خروجی بارهای از نوع الکتریکی و حرارتی را تامین می‌نماید. عناصر این سیستم شامل ترانسفورماتور، بویلر، مجموعه‌ی ذخیره‌کننده‌های الکتریکی و حرارتی و دو عدد DG بوده که یکی از آن‌ها از نوع CHP می‌باشد. مولد CHP وقتی که مورد بهره‌برداری قرار بگیرد، بطور همزمان برق و حرارت تولید می‌نماید. وجود ذخیره‌ساز حرارتی موجب می‌شود تا عملکرد CHP انعطاف بیشتری داشته باشد. در صورت عدم وجود ذخیره‌ساز حرارتی، توان حرارتی مازاد باید هدر داده شود که می‌تواند راندمان انرژی ریزشکبه را کاهش دهد. مشخصات عناصر هاب انرژی در جدول ۴-۱ آورده شده است. در این مطالعه، برای خودروهای الکتریکی موجود در ریزشکبه یک تجمیع‌گر در نظر گرفته شده است. در این‌جا فرض شده است که تجمیع‌گر خودروهای الکتریکی، به طور متوسط اتصال ظرفیت ۲۰۰ کیلووات‌ساعت باتری را به ریزشکبه تضمین می‌نماید. به عبارت دیگر، مدیریت ریزشکبه برنامه‌ریزی خود را بر اساس در دسترس بودن این میزان ظرفیت انجام می‌دهد و به عنوان یکی از نتایج، برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ را برای تجمیع‌گر تعیین می‌نماید. تجمیع‌گر وظیفه دارد تا طبق این برنامه‌ریزی، شارژ/دشارژ خودروها را انجام دهد که این موضوع در این بخش مورد مطالعه قرار نمی‌گیرد.

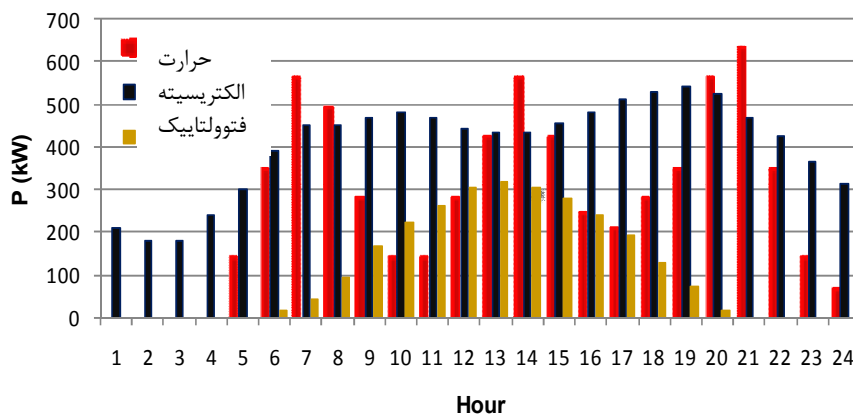


شکل ۴-۹. سیستم مورد مطالعه در برنامه‌ریزی تصادفی انرژی

جدول ۴-۱. مشخصات سیستم

$-500kW \leq P_e \leq 500kW, 0 \leq P_g \leq 2000kW$	ورودی
$\eta_{gh} = 0.98, -500 \leq P^T \leq 500$	ترانسفورماتور
$\eta_{ge} = 0.35, 50kW \leq P_{out}^{elec} \leq 200kW$ $SC = 1 \$/start, MUT = MDT = 1h$	مولد (MT) Microturbine
$\eta_{ge} = 0.35, \eta_{gh} = 0.45, MUT = MDT = 2h$ $50kW \leq P_{out}^{elec} \leq 350kW, SC = 2 \$/start$	مولد CHP
$\eta_{gh} = 0.8, 0 \leq P_{out}^h \leq 500$	بویلر
$\eta^{ch} = 0.95, \eta^{dch} = 0.95, P_{max}^{ch} = 50kW, P_{max}^{dch} = 50kW$ $E_{max} = 200kWh, E_{min} = 20kWh, E_0 = 50kWh$	ذخیره الکتریکی
$\eta^{ch} = 0.85, \eta^{dch} = 0.85, P_{max}^{ch} = 30Kw, P_{max}^{dch} = 30kW$ $E_{max} = 100kWh, E_{min} = 15kWh, E_0 = 20kWh$	ذخیره حرارتی
$\eta_{pv} = 0.186, A_{pv} = 2000m^2$	فتوولتاییک

مقادیر پیش‌بینی شده‌ی بارهای الکتریکی و حرارتی به همراه مقدار تولید فتوولتائیک برای یک روز آفتابی، در شکل ۴-۱۰ آورده شده است. در این مطالعه، سناریوهای متعددی برای تابش خورشید، بار الکتریکی، بار حرارتی و ظرفیت ذخیره‌ی الکتریکی در نظر گرفته شده است. سناریوها می‌توانند توسط نمونه‌برداری از یک تابع توزیع احتمال پیوسته بدست بیایند. البته این امکان وجود دارد تا یک جدول احتمال گسسته را به صورت تجربی بدست آورد و سناریوها را از روی آن تشکیل داد. جدول ۴-۲ اطلاعاتی را در مورد توزیع احتمال گسسته خطای پیش‌بینی مربوط به بار و تابش خورشید را برای سیستم مورد مطالعه نشان می‌دهد که به کمک این جدول، ۱۰۵۰ سناریوی مختلف تولید شده است.



شکل ۴-۱۰. بار الکتریکی، حرارتی و تولید فتوولتائیک پیش‌بینی شده

جدول ۴-۲. توزیع احتمال گسسته برای خطای پیش‌بینی بار مصرفی و تابش خورشید

احتمال	تابش خورشید		احتمال	بار الکتریکی	
	مقدار مورد انتظار (1h-12h)	مقدار مورد انتظار (13h-24h)		مقدار مورد انتظار (1h-12h)	مقدار مورد انتظار (13h-24h)
0.6	0%	0%	0.6	0%	0%
0.1	-1%	-2%	0.12	-1%	-1.5%
0.1	+1%	+1.5%	0.12	+1%	+1.5%
0.07	-3%	-3.5%	0.06	-2%	-2.5%
0.07	+3%	+3.5%	0.06	+2%	+2.5%
0.03	-4%	-4%	0.04	+2.5%	+3.5%
0.03	+4%	+4%			

احتمال	بار حرارتی		احتمال	ظرفیت ذخیره‌ی الکتریکی	
	مقدار مورد انتظار (1h-12h)	مقدار مورد انتظار (13h-24h)		مقدار مورد انتظار (1h-12h)	مقدار مورد انتظار (13h-24h)
0.6	0%	0%	0.65	0%	0%
0.15	-1.5%	-2%	0.1	-1%	-1.5%
0.15	+1%	+1.5%	0.1	+1%	+1.5%
0.05	-1.5%	-2.5%	0.075	-2%	-3%
0.05	+2%	+2.5%	0.075	+2%	+3%

هاب انرژی می‌تواند تا نیاز خود را به قیمت بازار انرژی از شبکه‌ی بالادستی خریداری کند. جدول ۳-۴ قیمت بازار انرژی را بصورت ساعتی نشان می‌دهد که از داده‌های بازار انرژی PJM در یکی از روزهای ماه جولای ۲۰۱۶ استخراج شده است [۱۰۷].

در بسیاری از کشورها، تعرفه‌ی گاز طبیعی برای بخش‌های مختلف مصرفی مانند صنعتی، خانگی و تجاری، متفاوت است. به طور نمونه تعرفه‌ی گاز صنعتی در کشور امریکا کمتر از تعرفه‌ی بخش مسکونی می‌باشد [۱۰۸]. بر خلاف بازار برق، در این مطالعه برای گاز طبیعی بازار روز آینده فرض نشده است. با توجه به امکان عقد قرارداد دوجانبه میان خریدار و فروشنده، یک تعرفه ثابت ۰/۰۱۸ دلار در هر کیلووات ساعت برای گاز طبیعی لحاظ شده است.

جدول ۳-۴. قیمت بازار انرژی [۱۰۷]

زمان	قیمت (\$/kWh)	زمان	قیمت (\$/kWh)	زمان	قیمت (\$/kWh)	زمان	قیمت (\$/kWh)
1	0.02419	7	0.02299	13	0.05048	19	0.05273
2	0.02263	8	0.02509	14	0.06277	20	0.04197
3	0.02132	9	0.02736	15	0.07214	21	0.03766
4	0.02038	10	0.03254	16	0.08289	22	0.03550
5	0.02040	11	0.03899	17	0.08767	23	0.02974
6	0.02164	12	0.04398	18	0.07410	24	0.02498

استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای این مطالعه بسیار سودمند به نظر می‌رسد. در روز قبل یا همان مرحله‌ی اول برنامه‌ریزی، بهره‌بردار ریزش‌بکه تصمیم می‌گیرد تا میزان تبادل انرژی را با شبکه‌ی بالادستی تعیین کند. این در حالیست که مقدار دقیق بار مصرفی و تولید فتوولتائیک، در مرحله‌ی دوم برنامه‌ریزی یعنی روز بهره‌برداری، معلوم می‌گردد. در برنامه‌ریزی پیشنهادی، تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی، در مدار قرار گرفتن مولدها و شارژ/دشارژ باتری و ذخیره‌ساز حرارتی به عنوان متغیرهای مرحله‌ی اول در نظر گرفته شده‌اند. در مرحله‌ی دوم که سناریوی واقعی تحقق می‌یابد، بهره‌بردار در مورد خرید گاز طبیعی و مقدار تولید مولدها تصمیم می‌گیرد. با توجه به این موارد، تمام معادلاتی که در بخش‌های قبلی توضیح داده شدند و شامل متغیرهای مرحله دوم

بودند، مربوط به زیرمساله‌ی مرحله دوم خواهند بود. بنابراین طبق مطالب گفته شده در بخش ۳-۳-۲

و با توجه به رابطه‌ی (۳-۴۰)، تابع هدف می‌تواند بصورت زیر بازنویسی گردد:

$$F = \sum_{t \in T} \left[ECOST_{el,t} + \sum_{i \in \Psi} C_{i,t}^{SU} \right] + \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \rho_s . ECOST_{ng,t,s} \quad (۴-۵۳)$$

نتایج شبیه‌سازی

برای مدیریت انرژی در ریزشبه‌ی مورد مطالعه، تابع هدف و قیود تساوی و نامساوی سیستم

به صورت یک برنامه‌ریزی خطی مرکب با عدد صحیح در محیط GAMS نوشته شده است. همانطور

که قبلاً نیز اشاره شد، در این مطالعه برای لحاظ کردن عدم قطعیت‌های مربوط به بار و تولید، روش

برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای پیشنهاد شده است. همچنین برای حل برنامه از EMP کمک گرفته

شده است. داده‌های مربوط به تابش خورشید نیز از سایت مربوط به سازمان آب و هوایی ناسا [۱۰۹]

دریافت شده است. نتایج شبیه‌سازی در دو حالت بررسی شده‌اند؛ تبادل یکطرفه انرژی و تبادل

دوطرفه.

حالت الف) تبادل انرژی یکطرفه:

در این قسمت همانطور که گفته شد، تبادل انرژی الکتریکی همانند گاز طبیعی، یکطرفه در

نظر گرفته شده است. به بیان دیگر هاب انرژی فقط می‌تواند از شبکه‌ی بالادستی خود انرژی دریافت

کند و امکان فروش به شبکه برای آن میسر نمی‌باشد. با انجام برنامه‌ریزی پیشنهادی، انرژی الکتریکی

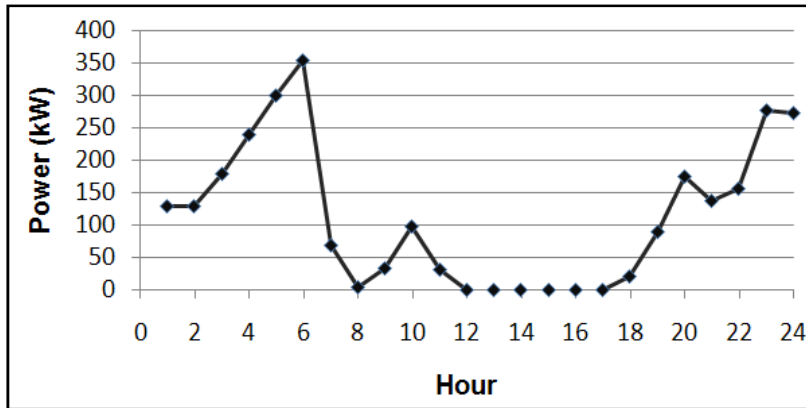
مورد نیاز در طول شبانه‌روز که باید از شبکه خریداری گردد در شکل ۴-۱۱ آورده شده است.

همانگونه که مشاهده می‌شود، EHO در زمان‌هایی که قیمت برق زیادتر است تقاضای نسبتاً کمی

برای خرید الکتریسیته دارد. این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که کمبود انرژی الکتریکی می‌تواند از

طریق منابع دیگر، یعنی فتوولتاییک و مولدهای محلی، تامین گردد. مولدهای محلی از طریق مصرف

گاز طبیعی می‌تواند بخشی از نیازهای الکتریکی را پاسخ دهند. همچنین مولد CHP و بویلر بارهای حرارتی را تامین می‌نمایند.



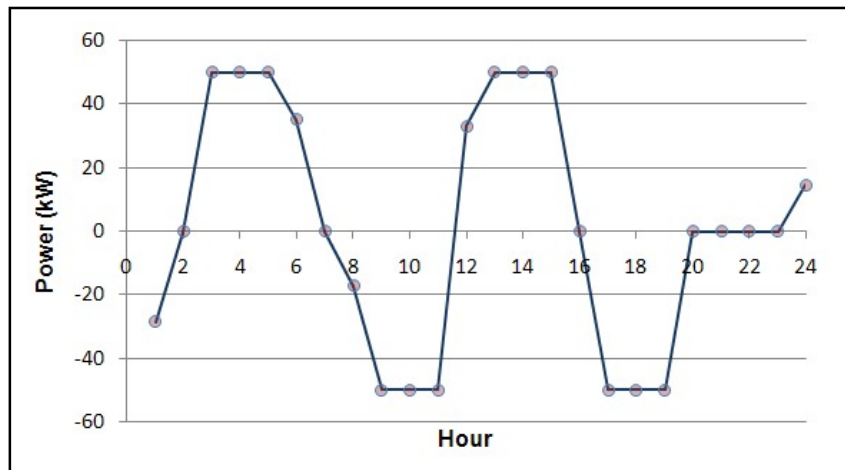
شکل ۴-۱۱. مقدار بهینه‌ی تقاضای الکتریسیته برای هاب انرژی

وضعیت روشن/خاموش بودن مولدها به عنوان متغیرهای مرحله اول در نظر گرفته شده است؛ در حالی که میزان تولید آن‌ها در گروه متغیرهای مرحله دوم لحاظ شده است. به عبارت دیگر در مرحله دوم یا همان ۲۴ ساعت روز آینده، مقدار توان تولیدی مولدها بر اساس سناریوی تحقق یافته تعیین می‌گردد. طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، وضعیت بهینه‌ی ورود/خروج واحدها از شبکه در جدول ۴-۴ نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، مولد CHP در تمام طول روز روشن خواهد بود و این در حالیست که مولد MT در طول دوره‌ی بهره‌برداری وارد مدار نخواهد شد. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان در راندمان این عناصر جستجو کرد به طوری که مولد CHP راندمان انرژی (نه صرفاً فقط برق) بالاتری نسبت به MT دارد.

جدول ۴-۴. وضعیت در مدار قرار گرفتن DG ها

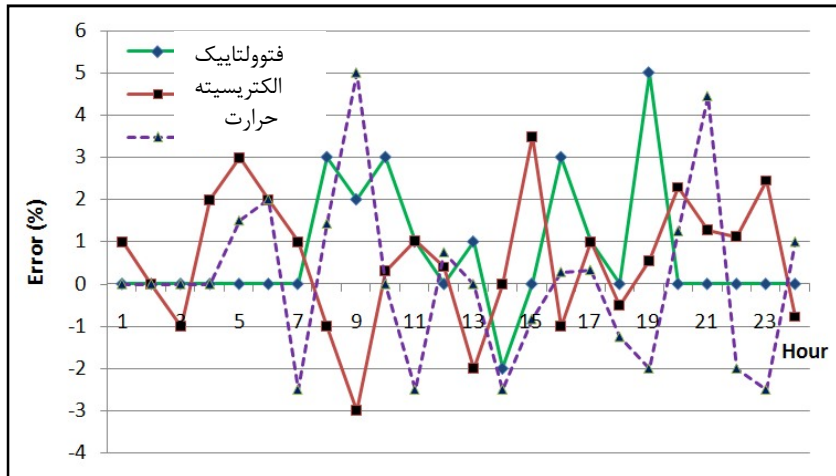
hour	CHP	MT	hour	CHP	MT	hour	CHP	MT
1	✓	—	9	✓	—	17	✓	—
2	✓	—	10	✓	—	18	✓	—
3	✓	—	11	✓	—	19	✓	—
4	✓	—	12	✓	—	20	✓	—
5	✓	—	13	✓	—	21	✓	—
6	✓	—	14	✓	—	22	✓	—
7	✓	—	15	✓	—	23	✓	—
8	✓	—	16	✓	—	24	✓	—

همچنین شکل ۴-۱۲ برنامه ریزی بهینه ی شارژ/دشارژ ذخیره ساز الکتریکی را نشان می دهد. همانگونه که انتظار می رفت، EHO تمایل دارد تا باتری ها در دوره هایی که قیمت انرژی ارزان تر است شارژ و در دوره های گران تر دشارژ شوند.

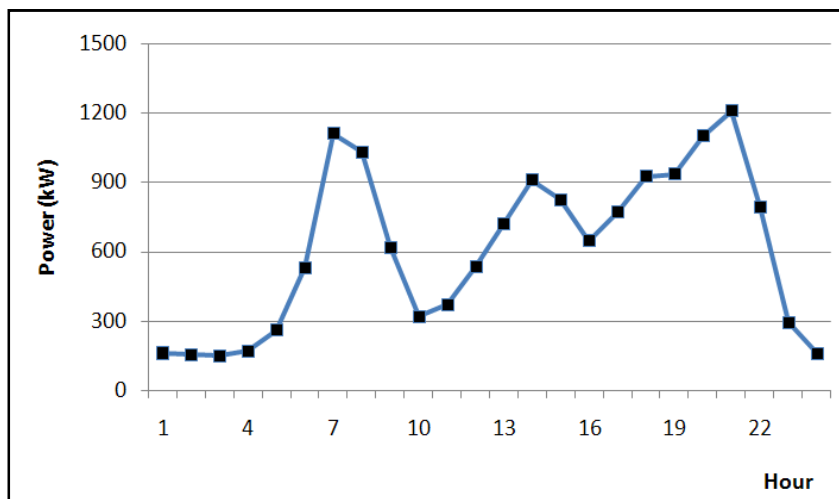


شکل ۴-۱۲. مقدار برنامه ریزی شده ی توان شارژ/دشارژ مجموعه باتری

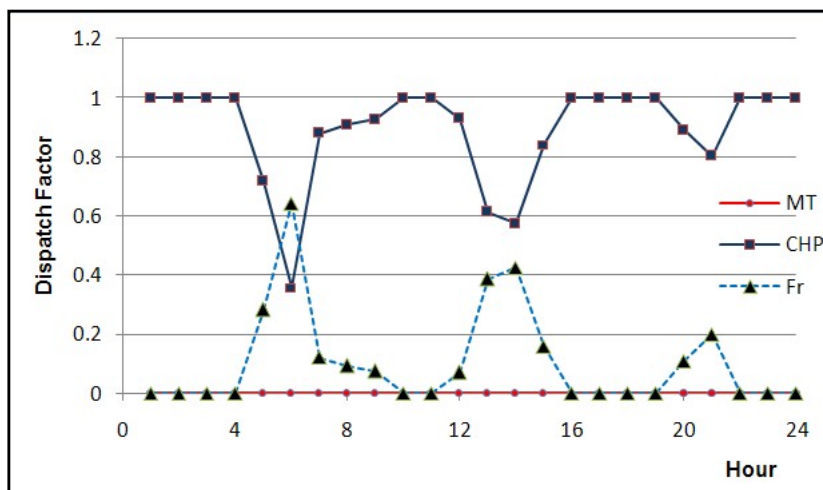
توان تولیدی مولدهای گازسوز و ضرایب توزیع، بخشی از متغیرهای تصمیم گیری مرحله دوم هستند. گرچه در برنامه ریزی دو مرحله ای پیشنهادی، مقادیر بهینه ی متغیرهای مرحله دوم برای هر سناریو از قبل محاسبه می شوند، اما هیچ تضمینی وجود ندارد که دقیقاً یکی از سناریوهای از پیش تعیین شده رخ دهد. بنابراین متغیرهای مرحله دوم هنگامی که پارامترهای دارای عدم قطعیت معلوم شدند، باید مجدداً محاسبه گردند. با فرض این که مقدار دقیق بارهای مصرفی و توان تولیدی فتوولتائیک n ساعت قبل معلوم شود، باید توزیع n -ساعت آینده مجدداً انجام شود. با در نظر گرفتن سناریوی تحقق یافته برای بارها و تولید فتوولتائیک مطابق با شکل ۴-۱۳، این توزیع مجدد نیز انجام شده است.



شکل ۴-۱۳. اختلاف بین مقدار واقعی و مقدار پیش‌بینی شده



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۴. مقدار برنامه‌ریزی شده (الف) نیاز گاز طبیعی (ب) ضرایب توزیع

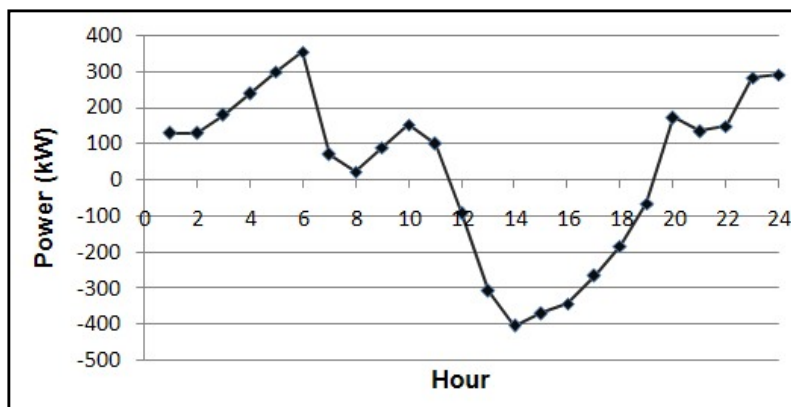
تحت این شرایط، شکل ۴-۱۳-الف مقدار گاز طبیعی مورد نیاز را که باید از شبکه خریداری شود، نمایش می‌دهد. طبق نتایج بدست آمده، در طول مدت زمانی که تقاضای حرارتی بالا بوده و قیمت برق هم نسبتاً گران است، بهره‌بردار تمایل دارد تا گاز طبیعی بیشتری را خریداری نماید. با توجه به وجود مولدهای گازسوز در ریزش شبکه، گاز طبیعی خریداری شده لزوماً فقط برای تامین بارهای حرارتی نخواهد بود. شکل ۴-۱۳-ب ضرایب توزیع مربوط به گاز ورودی به ریزش شبکه را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، سهم قابل توجه گاز خریداری شده توسط CHP به مصرف می‌رسد که البته در کنار برق، حرارت نیز تولید می‌کند.

با اعمال شیوه‌ی پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدیریت انرژی ریزش شبکه چیزی در حدود ۳۳۹ دلار هزینه در بر خواهد داشت.

حالت ب) تبادل انرژی دوطرفه:

در این حالت ریزش شبکه‌ی انرژی قادر است تا تولید مازاد خود را با قیمت بازار به شبکه‌ی اصلی بفروشد. مقدار توان تبدالی بهینه بین هاب انرژی و شبکه در شکل ۴-۱۵ آورده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، توان تبدالی در برخی ساعات مقدار منفی اختیار کرده است. این نشان می‌دهد که EHO ترجیح می‌دهد در این ساعات توان مازاد خود را به شبکه بفروشد. به عبارت دیگر، وقتی که قیمت بازار انرژی بالاست، EHO نه تنها درخواست خرید انرژی الکتریکی را کاهش می‌دهد، بلکه تولید محلی خود را نیز به شبکه عرضه می‌نماید.

طبق برنامه‌ریزی انجام شده، جدول ۴-۵ وضعیت روشن/خاموش بودن DG ها را نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است، بر خلاف حالت قبل، MT در برخی ساعات در مدار قرار دارد. با توجه به این که تابع هدف برنامه‌ریزی از نوع هزینه‌ی انرژی بوده است، تمایل به استفاده‌ی بیشتر از مولدهای گازسوز نشان می‌دهد که تبدیل گاز طبیعی به برق برای تامین بارهای محلی و همچنین فروش به شبکه، اقتصادی‌تر بوده است.



شکل ۴-۱۵. مقدار برنامه‌ریزی شده‌ی تبادل انرژی الکتریکی با شبکه

باید به این موضوع توجه داشت که با وجود اینکه مساله‌ی وارد کردن واحدهای تولیدی به مدار در مرحله‌ی اول تعیین می‌گردد، اما عدم قطعیت‌های مساله بر روی این تصمیم‌گیری اثرگذار بوده است. برنامه‌ریزی پیشنهادی با در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها، قادر است تا تصمیمات مربوط به خاموش/روشن کردن واحدها را بطور قطعی اتخاذ نماید؛ در حالی که مشخص نیست که چه سناریویی در آینده رخ خواهد داد. برای مقایسه و بررسی بهتر این موضوع، فرض شده که خطای پیش‌بینی وجود نداشته باشد. تحت این شرایط نتایج بدست آمده و در جدول ۴-۶ نشان داده شده‌اند. اختلافی که میان این الگوها دیده می‌شود ناشی از عدم قطعیت موجود در تولید و بار می‌باشد که برنامه‌ریزی تصادفی آن را در نظر می‌گیرد. به بیان دیگر، عدم قطعیت‌های مربوط به روز آینده (مرحله‌ی دوم) در تصمیم‌گیری‌های فعلی (مرحله‌ی اول) انعکاس پیدا کرده است؛ در حالی که این تصمیم‌ها به صورت قطعی اتخاذ می‌شوند و امکان تغییر آن‌ها در مراحل بعدی وجود نخواهد داشت.

جدول ۴-۵. وضعیت در مدار قرار گرفتن DG ها - برنامه‌ریزی تصادفی

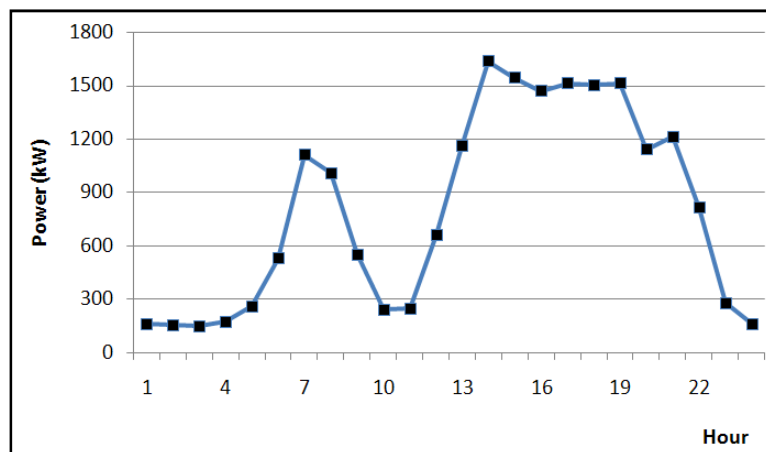
hour	CHP	MT	hour	CHP	MT	hour	CHP	MT
1	✓	—	9	✓	—	17	✓	✓
2	✓	—	10	✓	—	18	✓	✓
3	✓	—	11	✓	—	19	✓	✓
4	✓	—	12	✓	—	20	✓	—
5	✓	—	13	✓	✓	21	✓	—
6	✓	—	14	✓	✓	22	✓	—
7	✓	—	15	✓	✓	23	✓	—
8	✓	—	16	✓	✓	24	✓	—

جدول ۴-۶. وضعیت در مدار قرار گرفتن DG ها - بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت

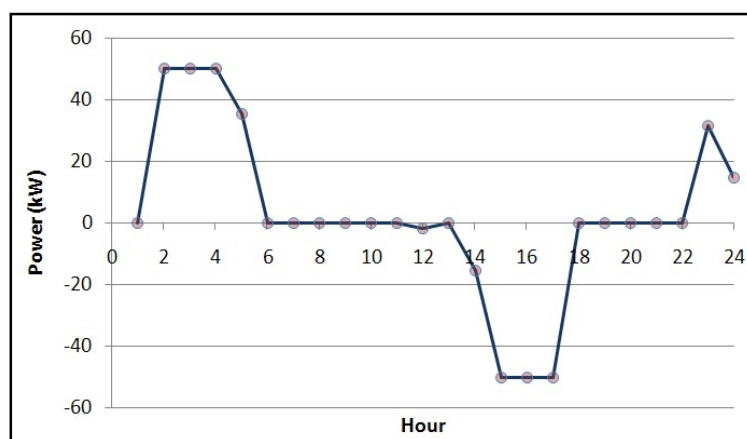
hour	CHP	MT	hour	CHP	MT	hour	CHP	MT
1	—	—	9	✓	—	17	✓	✓
2	—	—	10	✓	—	18	✓	✓
3	—	—	11	✓	—	19	✓	✓
4	—	—	12	✓	—	20	✓	—
5	—	—	13	✓	—	21	✓	—
6	—	—	14	✓	✓	22	✓	—
7	✓	—	15	✓	✓	23	—	—
8	✓	—	16	✓	✓	24	—	—

با توجه به این که ورود/خروج واحدها و توان تبدلی با شبکه نسبت به حالت (الف) تغییر کرده است، تولید DGها و الگوی شارژ/دشارژ ذخیره‌سازها نیز تغییر می‌نماید. شکل ۴-۱۶ تقاضای گاز طبیعی مورد نیاز را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، به دلیل افزایش تولید DGهای گازسوز، میزان گاز طبیعی خریداری شده از شبکه نیز افزایش یافته است. همچنین در شکل ۴-۱۷ توان شارژ / دشارژ باتری‌ها نمایش داده شده است. الگوی شارژ و دشارژ باتری‌ها نسبت به حالت قبلی تغییر کرده است و این تمایل وجود دارد تا این عناصر در ساعات ارزانی شارژ شوند. از طرف دیگر و با هدف کاهش هزینه‌ها، سیستم مدیریت انرژی تصمیم می‌گیرد که در ساعت گرانی برق، آن‌ها را دشارژ نماید. به کمک منابع در دسترس، EHO بار مورد نیاز ریزش‌بکه را تامین می‌نماید و از طرفی مازاد تولید خود را که ناشی از تولید DGها و دشارژ باتری‌ها بوده را به شبکه تحویل می‌دهد.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با اعمال برنامه‌ریزی تصادفی روز آینده، هزینه‌ی ۲۸۲/۹ دلاری برای هاب انرژی مورد انتظار می‌باشد؛ هر چند با تحقق سناریوی روز آینده طبق شکل ۴-۱۲، هزینه‌ی ۲۸۳/۱ دلاری در پایان روز بهره‌برداری حاصل شده است.



شکل ۴-۱۶. مقدار برنامه‌ریزی شده‌ی تقاضای گاز طبیعی



شکل ۴-۱۷. مقدار برنامه‌ریزی شده‌ی توان شارژ و دشارژ مجموعه باتری

۸-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل برنامه‌ریزی تصادفی انرژی برای یک ریزشکه شامل چندین حامل مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا مدل ریاضی هاب انرژی بیان شد و سپس روابط حاکم بر ریزشکه به صورت یک برنامه‌ریزی خطی مختلط با عدد صحیح نوشته شدند. در این مساله عدم قطعیت‌های بار مصرفی و تولید تجدیدپذیرها در نظر گرفته شدند. به منظور مدلسازی این عدم قطعیت‌ها، از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای استفاده شد. با در نظر گرفتن یک سیستم نمونه، مدیریت انرژی در یک ریزشکه شامل حامل‌های انرژی برق، گاز طبیعی و حرارت، مورد بررسی قرار گرفت. با بکارگیری

برنامه‌ریزی پیشنهادی، این امکان برای بهره‌بردار ریزشبهه بوجود آمد تا قبل از مشخص شدن عدم قطعیت‌ها، بتواند بطور قطعی مقدار تقاضای انرژی خود را به شبکه‌ی اصلی اعلام نماید. همچنین بهره‌بردار قادر است تا پس از معلوم شدن سناریوی واقعی، برخی تصمیمات خود را مانند مقدار تولید DG ها، تغییر دهد. با یک مقایسه میان برنامه‌ریزی قطعی و برنامه‌ریزی تصادفی، نشان داده شد که عدم قطعیت‌های مربوط به روز آینده بر روی تصمیماتی که بصورت قطعی در زمان فعلی اتخاذ می‌شوند نیز تاثیر دارند.

با توجه به این که قیمت انرژی الکتریکی نیز یکی دیگر از منابع مهم عدم قطعیت در سیستم‌های انرژی می‌باشد، در فصل آینده تاثیر این عدم قطعیت‌ها بر روی بهره‌برداری از هاب انرژی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل پنجم: بررسی تاثیر عدم قطعیت قیمت انرژی

الکتريکی بر روی بهره برداری ريزنسکه

۵-۱ مقدمه

در فصل قبل، مدلی برای برنامه‌ریزی تصادفی انرژی ارائه شد که در آن عدم قطعیت بار الکتریکی و تولید فتوولتاییک لحاظ شدند. در این فصل تاثیرات عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی بر روی بهره‌برداری از ریزشبکه‌ی انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، مساله‌ی برنامه‌ریزی انرژی در یک ریزشبکه مطرح شده و برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت انرژی، از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود. برای هر سطح از عدم قطعیت، مقدار سود حاصل از بهره‌برداری به صورت یک توزیع نرمال بدست آورده می‌شود. در ادامه، تاثیر استفاده از تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی بر روی ریسک حاصل از عدم قطعیت، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین با انجام شبیه‌سازی بر روی یک سیستم نمونه و تحلیل نتایج برای سطوح مختلف عدم قطعیت، کارآیی روش پیشنهادی نشان داده خواهد شد.

۵-۲ اهمیت مساله

عدم قطعیت‌های موجود در سیستم می‌تواند استراتژی‌های بهره‌برداری از سیستم انرژی را تحت تاثیر قرار دهد. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند از بخش‌های مختلف سیستم ناشی شوند که از جمله می‌توان به منابع انرژی تجدیدپذیر، بار مصرفی و قیمت انرژی اشاره نمود. در برخی مطالعات نشان داده شده است که بازار انرژی دارای یک سری ویژگی‌های منحصر به فردی می‌باشد که موجب شده تا قیمت این بازار در مقایسه با انواع دیگر بازارها، دارای پویایی بیشتری باشد [۱۱۰]. بنابراین عدم قطعیت‌هایی از این دست باید در تحلیل سیستم‌های انرژی در نظر گرفته شوند و به همین دلیل، در

این بخش تاثیرات عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی بر روی بهره‌برداری از ریزشبکه‌ی انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

همانطور که قبلاً هم اشاره شد، علاوه بر نفوذ DGها به شبکه، انتظار می‌رود که خودروهای الکتریکی در آینده‌ی نه چندان دور سهم قابل توجهی از بارهای سیستم قدرت را به خود اختصاص دهند. خودروهای مدرن با قابلیت بهره‌برداری V2G این توانایی را دارند تا هنگام اتصال به شبکه، به عنوان باتری ذخیره‌ساز مورد استفاده قرار بگیرند و در صورت نیاز انرژی خود را به شبکه تزریق نمایند. در نتیجه با اعمال برنامه‌ریزی انرژی، سیستم قدرت می‌تواند از این خودروها به عنوان یک بار و مولد قابل انعطاف بهره بگیرد [۱۱۱]. با توجه به این موارد، نقش خودروها در برخورد با عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی نیز در این فصل ارزیابی خواهد شد. به همین دلیل سیستم‌های مورد مطالعه در این فصل تحت دو سناریوی مختلف مورد بررسی قرار خواهند گرفت: با حضور خودروهای الکتریکی و بدون حضور آنها.

در این مطالعه فرض می‌شود که بهره‌بردار ریزشبکه به دنبال حداکثرسازی سود می‌باشد که با توجه به وجود عدم قطعیت قیمت انرژی، سود بهره‌برداری می‌تواند همراه با ریسک باشد. بنابراین استفاده از یک معیار برای کمی‌سازی ریسک مربوط به تغییرات سود، ضروری به نظر می‌رسد که در این مطالعه از معیار ضریب تغییر (CoV^۱) استفاده خواهد شد.

۵-۳ برنامه‌ریزی انرژی در ریزشبکه

در فصل گذشته، روابط حاکم بر مساله‌ی برنامه‌ریزی انرژی در ریزشبکه به طور مفصل بیان شدند که در این‌جا نیز از روابط مذکور مجدداً استفاده شده است. در مدل پیشنهادی، حداکثرسازی سود به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. همانند بسیاری از شبکه‌های توزیع فعلی، مشترکان ریزشبکه‌ها می‌توانند با چند تعرفه‌ی مشخص در طول شبانه‌روز سروکار داشته باشند که این تعرفه‌ها

^۱ Coefficient of variation

توسط بهره‌بردار ریزش‌بکه تعیین می‌شوند. همچنین با توجه به اتصال ریزش‌بکه به شبکه‌ی اصلی، در این مطالعه فرض شده است که بهره‌بردار می‌تواند با قیمت بازار برق روز آینده، نیاز خود را از شبکه‌ی بالادستی تامین نماید. با توجه به این موارد، مدیریت انرژی ریزش‌بکه به گونه‌ای می‌تواند انجام شود که سود ناشی از اختلاف میان درآمد فروش و هزینه‌ی خرید انرژی حداکثر گردد.

$$TP = \sum_{t \in T} [Pr_t] \times \Delta t \quad (1-5)$$

$$Pr_t = Re_t - C_t \quad (2-5)$$

$$Re_t = \sum_{\alpha \in \Omega} \pi_{\alpha,t}^s P_{\alpha,t}^s, \quad C_t = \sum_{\alpha \in \Omega} \pi_{\alpha,t}^b P_{\alpha,t}^b \quad (3-5)$$

که علائم و حروف استفاده شده در این روابط مطابق زیر می‌باشند:

TP : سود کل در طول دوره‌ی بهره‌برداری

Pr_t : مقدار سود در بازه زمانی t

Re_t : درآمدها در بازه زمانی t

C_t : هزینه‌ها در بازه زمانی t

$P_{\alpha,t}^b, P_{\alpha,t}^s$: به ترتیب مقدار توان تزریقی و دریافتی از شبکه در بازه زمانی t

$\pi_{\alpha,t}^b, \pi_{\alpha,t}^s$: به ترتیب قیمت انرژی فروخته شده و خریداری شده در بازه زمانی t

Ω : مجموعه حامل‌های انرژی شبکه

T : تعداد کل دوره‌های زمانی (افق برنامه‌ریزی)

برای برنامه‌ریزی انرژی در ریزشبه‌ی مذکور، تابع هدف و قیود زیر در مساله‌ی بهینه‌سازی لحاظ شده‌اند.

$$\text{Max} \quad TP = \sum_{t \in T} [Pr_t] \times \Delta t \quad (۴-۵)$$

s.t

$$L_t = [\Gamma_t] P_t \quad (۵-۵)$$

$$P^{\min} \leq P_t \leq P^{\max} \quad (۶-۵)$$

$$\gamma_{\alpha\beta,t} = \sum_k W_k \cdot \theta_t^{\alpha,k} \eta_{\alpha\beta}^k \quad (۷-۵)$$

$$0 \leq \theta_t^{\alpha,k} \leq 1 \quad (۸-۵)$$

$$w_{j,t} \cdot P_{j,\min}^{DG} \leq P_{j,t}^{DG} \leq w_{j,t} \cdot P_{j,\max}^{DG} \quad (۹-۵)$$

$$E_{i,t} - E_{i,t-1} = [\eta_i^{ch} \times q_{i,t}^{ch} - \frac{1}{\eta_i^{dch}} q_{i,t}^{dch}] \Delta t \quad (۱۰-۵)$$

$$E_{i,\min} \leq E_{i,t} \leq E_{i,\max} \quad (۱۱-۵)$$

$$q_{i,t}^{dch} \leq r_{i,t} \times q_{i,\max}^{dch} \quad (۱۲-۵)$$

$$q_{i,t}^{ch} \leq s_{i,t} \times q_{i,\max}^{ch} \quad (۱۳-۵)$$

$$q_{i,t}^{dch}, q_{i,t}^{ch} \geq 0 \quad (۱۴-۵)$$

$$r_{i,t} + s_{i,t} \leq 1 \quad (۱۵-۵)$$

$$p_t^{grid} = p_{b,t}^{grid} + p_{s,t}^{grid} \quad (۱۶-۵)$$

$$p_{b,t}^{grid} \leq \alpha_t p_{\max}^{grid} \quad (۱۷-۵)$$

$$p_{s,t}^{grid} \leq (1 - \alpha_t) p_{\max}^{grid} \quad (۱۸-۵)$$

$$p_{b,t}^{grid}, p_{s,t}^{grid} \geq 0 \quad (۱۹-۵)$$

$$s, r, w \in \{1, 0\} \quad (۱۹-۵)$$

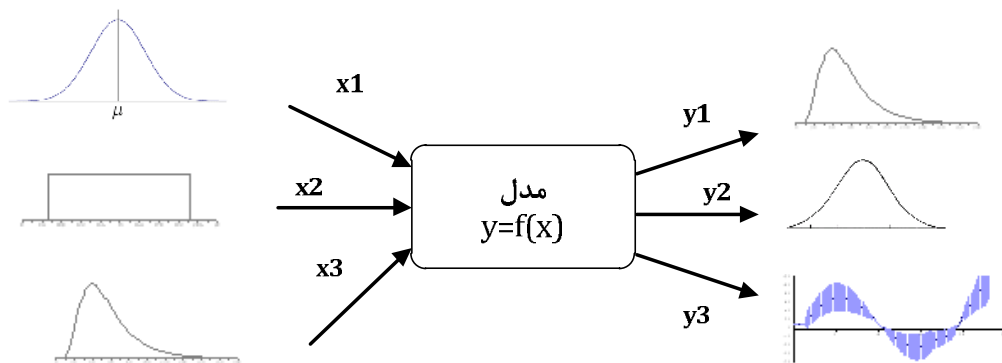
$$(۲۰-۵)$$

هرچند این روابط در فصل‌های سوم و چهارم توضیح داده شدند، اما علائم و حروف استفاده شده در این مساله مجدداً در ادامه آورده شده است.

پارامترها و متغیرها				بالانویس و پایین نویس ها	
L	بردار بار مصرفی	p^{DG}	توان تولیدی DG	t	زمان
Γ	ماتریس توزیع	p^{grid}	توان تبادلی با شبکه	a, s, r, w	متغیرهای باینری
P	بردار توان ورودی	p_b^{grid}	توان دریافتی از شبکه	min / max	حداکثر/حداقل
γ	ضریب توزیع	p_s^{grid}	توان تحویلی به شبکه	ch / dch	دشارژ/شارژ
η	راندمان	E	انرژی ذخیره شده	α, β	حامل‌های انرژی
θ	ضریب توزیع	Δt	گام برنامه‌ریزی	k	شمارنده‌ی مبدل
		q	توان ذخیره‌کننده	i	شمارنده‌ی خودرو

۴-۵ عدم قطعیت قیمت

این فصل قصد دارد تا تاثیر عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی را بر روی برنامه‌ریزی انرژی در یک ریزشبکه بررسی نماید. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت انرژی، روش شبیه‌سازی مونت کارلو مورد استفاده قرار گرفته است. روش مونت کارلو به کمک تولید اعداد تصادفی از روی یک تابع توزیع احتمال، این امکان را به وجود می‌آورد تا با شبیه‌سازی کردن تعداد زیادی مدل قطعی، بتوان مدل تصادفی را تحلیل نمود. شکل ۵-۱ این عملکرد را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، ورودی‌های سیستم می‌توانند به صورت تصادفی توسط هر نوع توزیع احتمالی تولید شوند. با هر بار نمونه‌برداری از روی تابع توزیع احتمال، یک مدل قطعی شبیه‌سازی می‌شود. با تکرار این فرایند، خروجی‌های مختلفی حاصل خواهند شد که از طریق آن‌ها می‌توان بر روی نوع توزیع خروجی و همچنین مواردی مانند میانگین و واریانس آن‌ها بحث نمود.



شکل ۵-۱. شماتیک عملکرد شبیه‌سازی مونت کارلو

بنابراین به کمک روش مونت کارلو، می‌توان با نمونه‌برداری از روی یک تابع توزیع احتمال که مقدار میانگین و واریانس آن مشخص است، سناریوهای مختلف قیمت انرژی الکتریکی را در کل ساعات شبانه‌روز بررسی نمود. تحت این شرایط و به منظور در نظر گرفتن سطوح مختلف عدم قطعیت، در این مطالعه مقادیر مختلفی برای انحراف معیار در نظر گرفته شده است. اگر μ مقدار میانگین قیمت باشد، قیمت دارای عدم قطعیت می‌تواند به صورت زیر مدل شود [۱۱۲]:

$$\pi = \mu + \sigma e \quad (۲۱-۵)$$

که e متغیر تصادفی بوده و دارای یک توزیع احتمال با میانگین صفر می‌باشد. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که σ انحراف معیار قیمت π می‌باشد.

در اینجا فرض شده است که رفتار قیمت برق از یک توزیع نرمال با میانگین μ و انحراف معیار σ تبعیت می‌کند. به منظور مدل‌سازی قیمت با عدم قطعیت، قیمت در هر ساعت می‌تواند از ضرب میانگین قیمت در ضریب F حاصل گردد که F دارای یک توزیع نرمال می‌باشد [۱۱۲].

$$\pi = \mu.F \quad (۲۲-۵)$$

$$F \sim N(1, \sigma') \quad (۲۳-۵)$$

که F ضریبی با میانگین واحد و انحراف معیار σ' می‌باشد. انحراف معیار ضریب F بدون بُعد^۱ می‌باشد. به عنوان مثال $F \sim N(1, 20\%)$ یعنی اینکه قیمت برق توسط یک توزیع نرمال مدل شده است که انحراف معیار قیمت برق، ۲۰٪ میانگین آن می‌باشد.

از آنجا که وجود عدم قطعیت قیمت انرژی می‌تواند بهره‌برداری از سیستم را با ریسک مواجه نماید، معیار ضریب تغییر به منظور کمی‌سازی مقدار ریسک مورد استفاده قرار گرفته است. این معیار از تقسیم نمودن انحراف معیار بر مقدار میانگین بدست می‌آید [۱۱۳]:

$$CoV = \frac{SD}{EX} \quad (۲۴-۵)$$

که SD و EX در این رابطه به ترتیب بیانگر مقدار انحراف معیار و میانگین توزیع احتمال می‌باشند. این معیار کمک می‌کند تا بتوان میزان ریسک را تحت شرایط مختلف عدم قطعیت مورد مقایسه قرار داد. اگر معیار ضریب تغییر برای استراتژی‌های مختلف بهره‌برداری معلوم باشد، آن استراتژی‌هایی که دارای ضریب بزرگتری هستند ریسک بیشتری را به همراه خواهند داشت [۱۱۳].

تابع قابلیت اطمینان $R(t)$ یکی از راه‌های اندازه‌گیری مهم برای سنجش سطح اطمینان استراتژی می‌باشد که در اینجا مورد استفاده قرار گرفته است. معمولاً $R(t)$ اینگونه تعریف می‌شود: احتمال بهره‌برداری سیستم بدون رخداد خطا تا قبل از زمان t [۱۱۴]. حال در این مطالعه $R(x)$ اینگونه تعریف می‌شود: احتمال اینکه ریزشکه مورد بهره‌برداری قرار بگیرد به طوری که میزان سود کمتر از x نشود. برای متغیر پیوسته x با تابع توزیع احتمال تجمعی $G(x)$ ، تابع قابلیت اطمینان بصورت زیر تعریف می‌گردد [۱۱۴]:

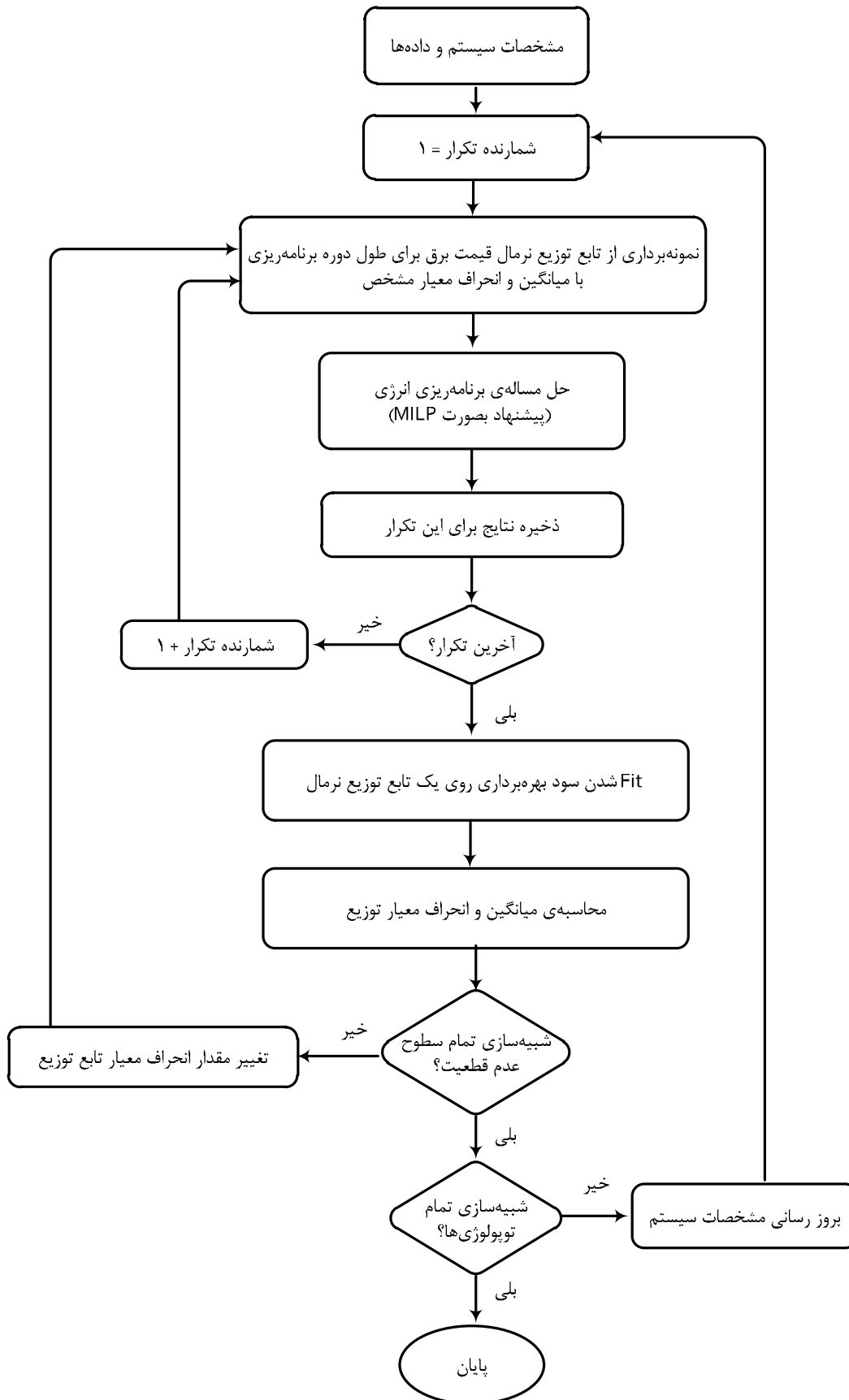
$$R(x) = 1 - G(x) \quad (۲۵-۵)$$

^۱ Dimension

۵-۵ آنالیز حساسیت

در این مطالعه ابتدا به کمک نمونه‌برداری از یک تابع توزیع نرمال با میانگین و واریانس مشخص، سناریوی قیمت تولید می‌شود. سپس برای یک سیستم با اطلاعات و داده‌های مشخص، مساله‌ی برنامه‌ریزی انرژی حل می‌شود. در این بخش، مساله‌ی برنامه‌ریزی انرژی به صورت یک برنامه‌ریزی خطی با متغیر صحیح مطابق با (۵-۵) تا (۲۰-۵) پیشنهاد شده است. به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو، N بار سناریوی قیمت تولید شده و هر بار مساله‌ی برنامه‌ریزی حل می‌شود. مقدار سود بهره‌بردار در هر تکرار ثبت شده و پس از پایان N تکرار، این مقادیر به کمک تولباکس Matlab Dfitool [۱۱۵] بر روی یک توزیع نرمال برازش می‌شوند و میانگین و واریانس این توزیع محاسبه می‌گردد. با تغییر واریانس توزیع نرمال، سطح جدیدی از عدم قطعیت قیمت بدست می‌آید و مراحل ذکر شده مجدداً برای این حالت تکرار می‌شوند.

تمامی مراحل بالا را می‌توان برای یک سیستم با توپولوژی متفاوت انجام داد. به عنوان مثال می‌توان با این کار تاثیر حضور منابع تولیدپراکنده و یا خودروهای الکتریکی را بررسی نمود. شکل ۵-۲ مراحل انجام این مطالعه را به طور ساده نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲. فلوچارت مرتبط با ارزیابی‌های انجام شده با روش شبیه‌سازی مونت کارلو

۵-۶ بررسی سیستم نمونه

مشخصات سیستم

به منظور شبیه‌سازی روش پیشنهادی، همانطور که در جدول ۵-۱ نشان داده شده است، در این قسمت سه سیستم نمونه را مورد بررسی قرار می‌دهیم. تفاوت این سیستم‌ها در وجود و عدم وجود DG و همچنین نوع آن می‌باشد. شبیه‌سازی‌های مربوط به این سه توپولوژی، در دو وضعیت انجام شده است: بدون حضور خودروهای الکتریکی و با حضور خودروهای الکتریکی. مشخصات عناصر مختلف موجود در شبکه در جدول ۵-۲ آورده شده است.

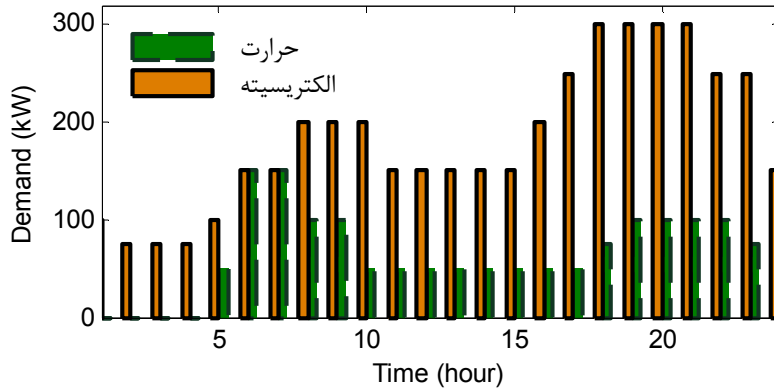
جدول ۵-۱. کلاس‌بندی سیستم‌های مورد مطالعه

خودروی الکتریکی	تولید پراکنده	بویلر	شبکه		سناریو	سیستم نمونه
			گاز طبیعی	برق		
-	-	✓	✓	✓	I	سیستم ۱
✓					II	
-	✓ (فقط برق)	✓	✓	✓	I	سیستم ۲
✓					II	
-	✓ (برق و حرارت)	✓	✓	✓	I	سیستم ۳
✓					II	

جدول ۵-۲. مشخصات سیستم مورد مطالعه

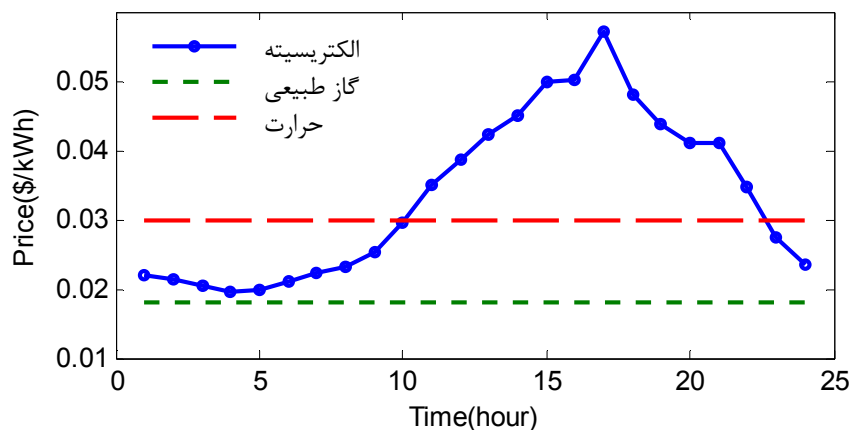
$-500 \leq P_e \leq 500, 0 \leq P_g \leq 2000$	حامل‌های ورودی (برق و گاز طبیعی)	
$\eta_{ge} = 0.35, 50kW \leq P_{out}^{elec} \leq 200kW$	فقط برق	تولید پراکنده
$\eta_{gh} = 0.45$	با قابلیت بازیابی حرارت (CHP)	
$\eta_{gh} = 0.8, 0 \leq P_{out}^h \leq 150kW$	بویلر	
$\eta^{ch} = 0.95, \eta^{dch} = 0.95,$ $P_{max}^{ch} = 10kW, P_{max}^{dch} = 10kW$ $E_{max} = 35kWh, E_{min} = 5kWh$	خودروی الکتریکی	

ریزشبکه‌ی مورد مطالعه به زیرساخت‌های الکتریکی و گاز طبیعی متصل می‌باشد. منحنی‌های بار حرارتی و الکتریکی (بدون خودرو) برای ریزشبکه در یک روز نمونه، در شکل ۳-۵ آورده شده است. الگوی بارهای نشان داده شده، غیر منعطف بوده و باید بطور کامل تامین شوند.

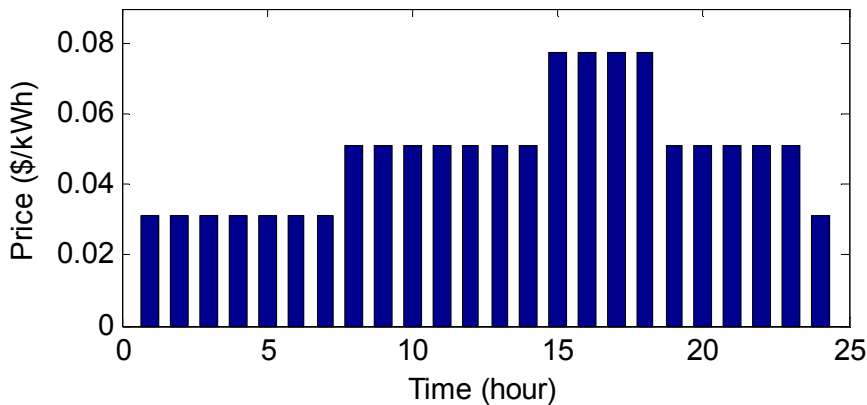


شکل ۳-۵. بارهای الکتریکی و حرارتی ریزشبکه

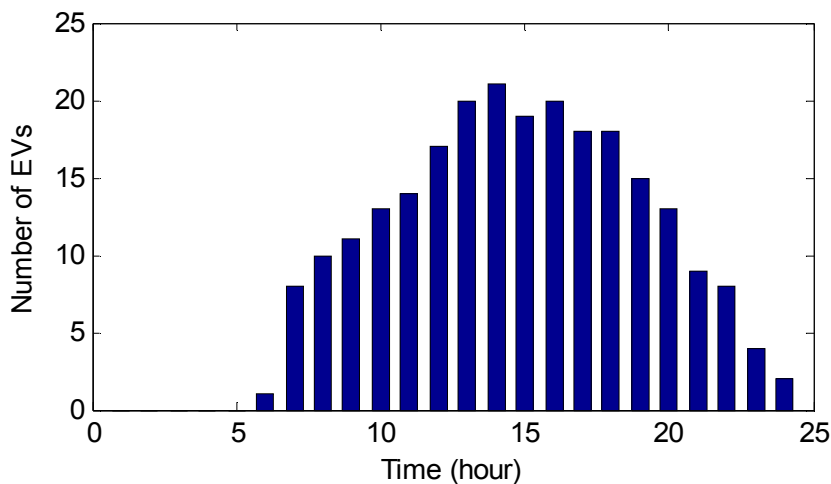
مشابه با فصل‌های قبلی، به دلیل آنکه قیمت انرژی در بازار روز آینده بصورت ساعتی اعلام می‌گردد، در این مطالعه نیز گام‌های یک ساعته برای برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده‌اند. به همین منظور از قیمت‌های بازار روز آینده PJM طبق جدول ۳-۴ استفاده شده است. برای گاز طبیعی و حرارت نیز قیمت‌های ثابت در نظر گرفته شده است که به ترتیب 0.18 و 0.3 دلار بر کیلووات ساعت می‌باشند. قیمت برق، گاز و حرارت در شکل ۴-۵ آورده شده‌اند.



شکل ۴-۵. قیمت‌های برق، گاز طبیعی و حرارت در یک روز نمونه



شکل ۵-۵. تعرفه‌ی برق برای شبکه‌ی توزیع



شکل ۵-۶. تعداد خودروهای پارک شده در پارکینگ هوشمند

برای مشترکان موجود در شبکه‌ی توزیع، سه تعرفه مختلف در طول روز فرض شده است که در شکل ۵-۵ نشان داده شده است. بهره‌بردار ریزش‌بکه، انرژی را طبق این تعرفه‌ها به بارهای غیرخوردویی می‌فروشد.

در این مطالعه یک پارکینگ نزدیک به یک مرکز تجاری در نظر گرفته شده که ظرفیت آن ۴۰ خودرو فرض شده است. هرچند برنامه‌ریزی مورد نظر این قابلیت را دارد تا پارکینگ با هر تعداد خودرو را در نظر بگیرد. زمان ورود خودروها بین ساعات ۶ و ۱۸ می‌باشد. مدت زمان پارک خودروها در پارکینگ نیز به عنوان یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۲ و ۸ ساعت لحاظ شده است. با توجه به این موارد، میزان خودروهای پارک شده در پارکینگ در شکل ۵-۶ آورده شده است.

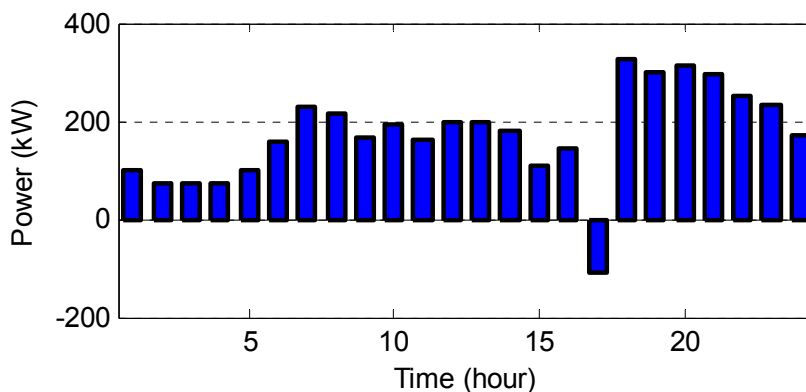
بهره‌بردار سیستم می‌تواند اطلاعات مربوط به خودروها را از طریق زیرساخت‌های V2G دریافت نماید [۱۱۶]. همچنین این امکان وجود دارد تا میان مالکان خودروها و مالک پارکینگ هوشمند، قراردادی منعقد گردد. این موضوع می‌تواند دوره‌ی شارژ/دشارژ خودروها را قابل پیش‌بینی‌تر کند [۱۱۶].

انگیزه‌ی مالکان خودروها بابت این که اجازه دهند تا خودروهایشان دشارژ گردد، در این بخش مورد بررسی قرار نگرفته است. فرض شده است که مالکان خودروهای موجود در پارکینگ، خودروهایشان را در طول روز با قیمت ثابت $0/065 \text{ \$/kWh}$ شارژ و با قیمت $0/069 \text{ \$/kWh}$ دشارژ می‌نمایند.

۷-۵ نتایج برنامه‌ریزی انرژی - قیمت قطعی

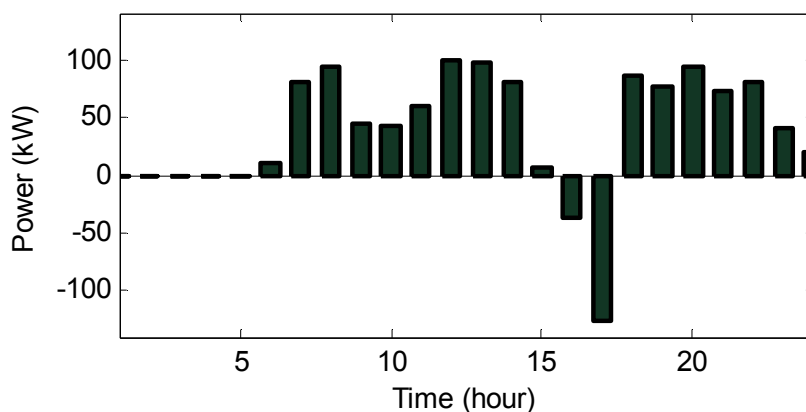
برای نشان دادن عملکرد برنامه‌ریزی انرژی، نتایج شبیه‌سازی برای یکی از سیستم‌های نمونه با مشخصات جدول ۵-۱ در این بخش آورده شده است. بدین منظور سیستم ۳ تحت سناریوی II (وجود خودروهای الکتریکی) انتخاب شده است. بهره‌بردار سیستم موظف است تا تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی، میزان ذخیره‌ی انرژی و توزیع منابع تولید پراکنده را به گونه‌ای انجام دهد تا حداکثر سود حاصل گردد. در این قسمت فرض شده است که قیمت انرژی قطعی بوده و همانند شکل ۵-۴ می‌باشد. برای انجام برنامه‌ریزی در ریزشبکه‌ی انرژی، تابع هدف و قیود تساوی و نامساوی سیستم به صورت برنامه‌ریزی MILP در نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی شده و نتایج بدست آمده‌اند.

با اعمال برنامه‌ریزی پیشنهادی، مقادیر بهینه‌ی متغیرهای تصمیم‌گیری شامل خرید/فروش انرژی از/به شبکه‌ی بالادستی و شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی بدست می‌آیند. طبق نتایج شبیه‌سازی، شکل ۵-۷ مقدار بهینه‌ی انرژی تبدالی میان ریزشبکه و شبکه‌ی اصلی را نشان می‌دهد. از جایی که بارهای الکتریکی می‌توانند از طریق گاز طبیعی (توسط CHP) و یا از طریق دشارژ خودروهای الکتریکی تامین شوند، بهره‌بردار تمایل دارد تا در ساعات گرانی قیمت انرژی، برق کمتری را از شبکه خریداری کند. همچنین در شکل ۵-۷ قابل مشاهده است که طبق برنامه‌ریزی، بهره‌بردار تولید مازاد خود را در ساعت ۱۷ به شبکه می‌فروشد.



شکل ۵-۷. میزان تبادل انرژی الکتریکی برنامه‌ریزی شده

الگوی بهینه‌ی شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی نیز در شکل ۵-۸ نشان داده شده است. بهره‌بردار ریزشبه خودروهایی الکتریکی را بگونه‌ای مدیریت می‌کند تا زمان‌های شارژ آن‌ها تا حد امکان به ساعات ارزانی قیمت انرژی الکتریکی و همچنین ساعات دشارژ آن‌ها به ساعات گرانی جابجا گردد. این موضوع باعث می‌شود تا الگوی بار شبکه کمی تغییر نماید. به همین دلیل مساله‌ی برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی بسیار به مساله‌ی پاسخگویی بار نزدیک می‌باشد ([۱۱۷] و [۱۱۸]). پارکینگ هوشمند همانطور که می‌تواند یک بار منعطف باشد، یک ذخیره‌کننده نیز به شمار می‌آید. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، مقدار سود بهره‌برداری با اعمال برنامه‌ریزی پیشنهادی چیزی در حدود ۱۲۷ دلار خواهد بود.



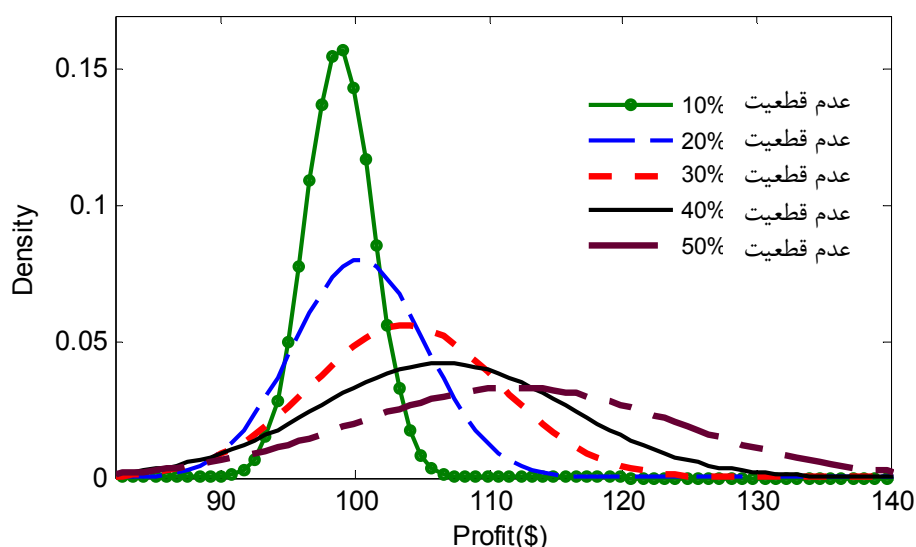
شکل ۵-۸. میزان توان مورد نیاز پارکینگ

۵-۷-۱ تاثیرات عدم قطعیت قیمت

همانطور که اشاره شد، این فصل تاثیر عدم قطعیت قیمت را بر روی بهره‌برداری از ریزشبهه ارزیابی می‌کند. همچنین اثرات حضور تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی بر روی سود مورد انتظار و تغییرات آن مورد بررسی قرار می‌گیرند. بدین منظور برنامه‌ریزی انرژی برای تمام سیستم‌های جدول ۱-۵ و برای ۵ سطح مختلف عدم قطعیت (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) انجام شده است.

برای بررسی چگونگی پاسخ ریزشبهه به عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی، روش شبیه‌سازی مونت کارلو مورد استفاده قرار گرفته است. قیمت انرژی الکتریکی در هر لحظه به عنوان یک توزیع نرمال در نظر گرفته شده است که مقدار میانگین آن قبلاً در شکل ۴-۵ نشان داده شد. تغییرات قیمت برق نیز مطابق آنچه که در بخش (۴-۵) بیان شد، در نظر گرفته شده است.

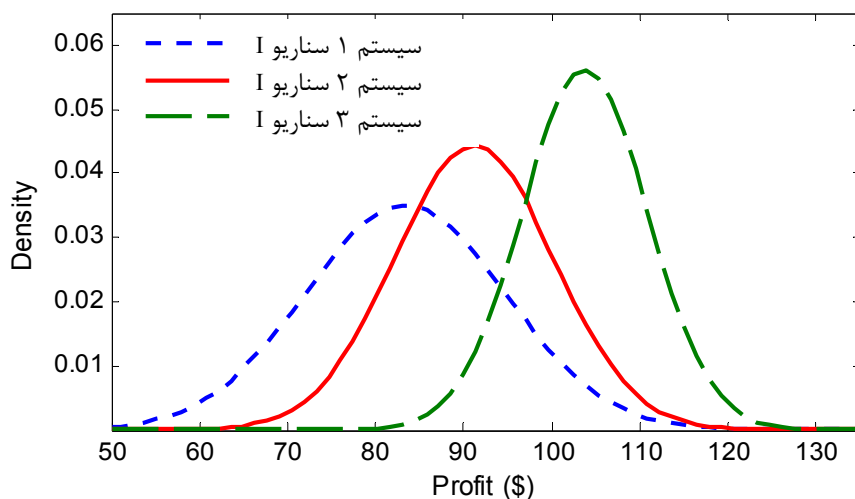
برای نشان دادن این که سطوح مختلف عدم قطعیت قیمت بر روی سود بهره‌برداری ریزشبهه چه تاثیری دارد، سیستم سوم بدون حضور خوردوها در نظر گرفته شده است. تابع چگالی احتمال برای سود ریزشبهه تحت این شرایط در شکل ۵-۹ ترسیم شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، انتظار می‌رود که تغییرات سود با بالا رفتن سطح عدم قطعیت قیمت، افزایش یابد.



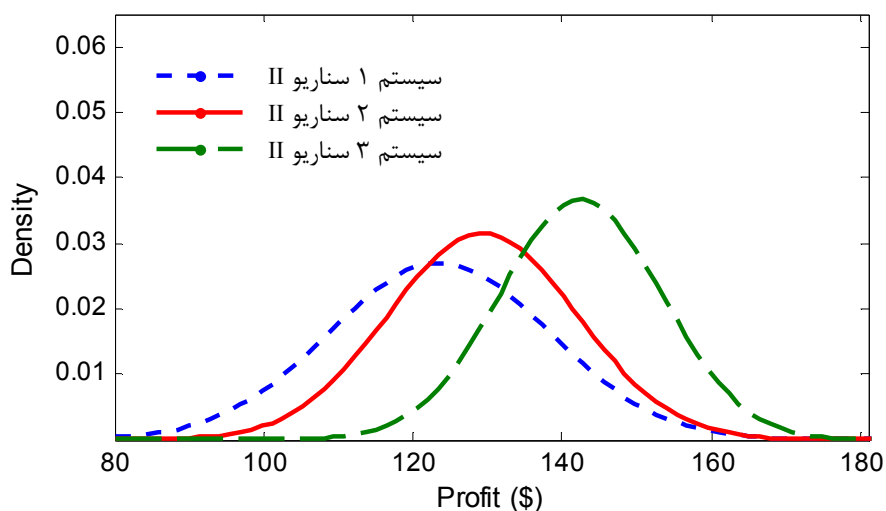
شکل ۵-۹. تابع چگالی احتمال سود بهره‌بردار ریزشبهه تحت شرایط مختلف عدم قطعیت

۵-۷-۲ بررسی حضور DG و خودروها

به منظور بررسی تاثیرات حضور DG و خودروها روی بهره‌برداری ریزشبه در شرایط عدم قطعیت، به عنوان نمونه عدم قطعیت ۳۰ درصدی برای قیمت لحاظ شده است و نتایج برای سیستم‌های ذکر شده در جدول ۵-۱، بدست آمده است. شکل‌های ۵-۱۰ و ۵-۱۱، تابع توزیع احتمال را برای سه سیستم در دو وضعیت بدون حضور خودرو و شامل خودروهای الکتریکی نشان داده‌اند که این نتایج تحت شرایط قیمت با عدم قطعیت ۳۰ درصدی حاصل شده است. همانطور که قبلاً هم بیان شد، ترکیب زیرساخت‌های الکتریکی و گاز طبیعی، ریزشبه را از دیدگاه تامین بار منعطف‌تر می‌سازد. در شکل ۵-۱۰ قابل مشاهده است که سود مورد انتظار ریزشبه وقتی که سیستم منعطف‌تر است بیشتر است. همچنین با توجه به شکل ۵-۱۱، می‌توان گفت که در حضور خودروهای الکتریکی سود بیشتری مورد انتظار می‌باشد.



شکل ۵-۱۰. تابع چگالی احتمال سود برای عدم قطعیت ۳۰٪ بدون حضور خودروهای الکتریکی



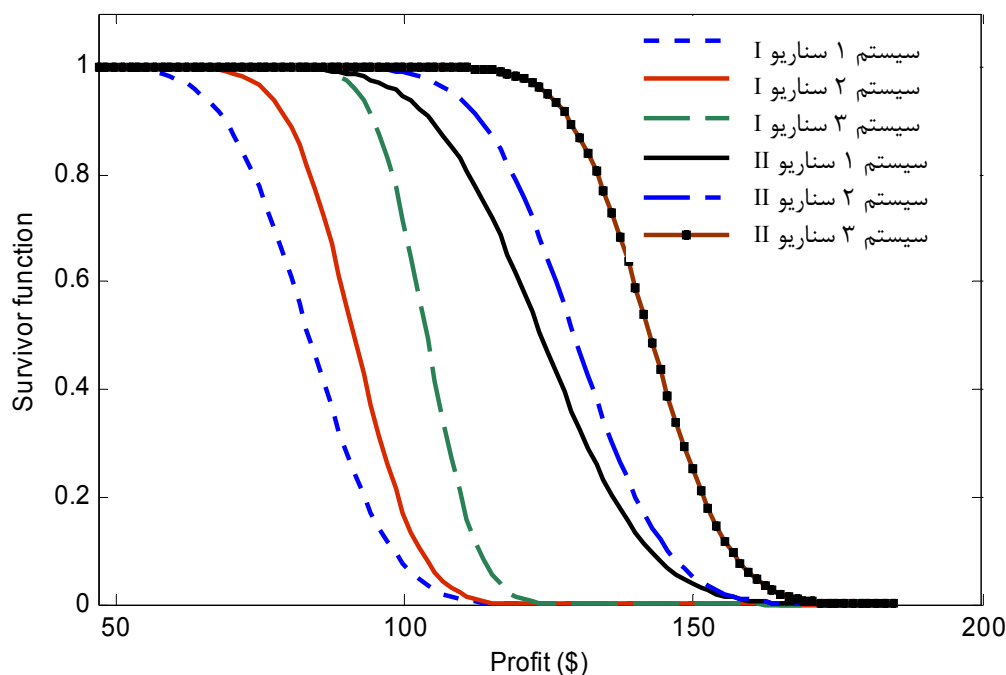
شکل ۵-۱۱. تابع چگالی احتمال سود برای عدم قطعیت ۳۰٪ با حضور خودروهای الکتریکی

مقدار متوسط، انحراف معیار و ضریب تغییر برای این توابع چگالی احتمال، در جدول ۵-۳ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ترکیب بیشتر زیرساخت‌های الکتریکی و گاز طبیعی موجب افزایش سود مورد انتظار و کاهش ریسک شده است. همچنین اضافه شدن خودروهای الکتریکی به شبکه، مقدار سود مورد انتظار را نسبت به حالت بدون خودرو افزایش داده است. مقدار ضریب تغییر برای سیستم ۱ کاهش یافته است؛ در حالی که این معیار برای سیستم ۲ تقریباً ثابت مانده است. در سیستم ۳، ضریب تغییر از ۰/۰۶۹ به ۰/۰۷۶ افزایش یافته است که البته در مقایسه با دیگر سیستم‌ها، این مقدار خیلی قابل توجه نمی‌باشد.

جدول ۵-۳. پارامترهای مربوط به تابع چگالی احتمال و ضریب تغییر

توپولوژی	سناریو	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییر
سیستم ۱	(I) بدون حضور خودرو	83.35	11.39	0.137
		91.15	9.01	0.099
		103.73	7.10	0.069
سیستم ۲	(II) با حضور خودرو	123.56	14.78	0.119
		129.35	12.65	0.098
		142.48	10.89	0.076

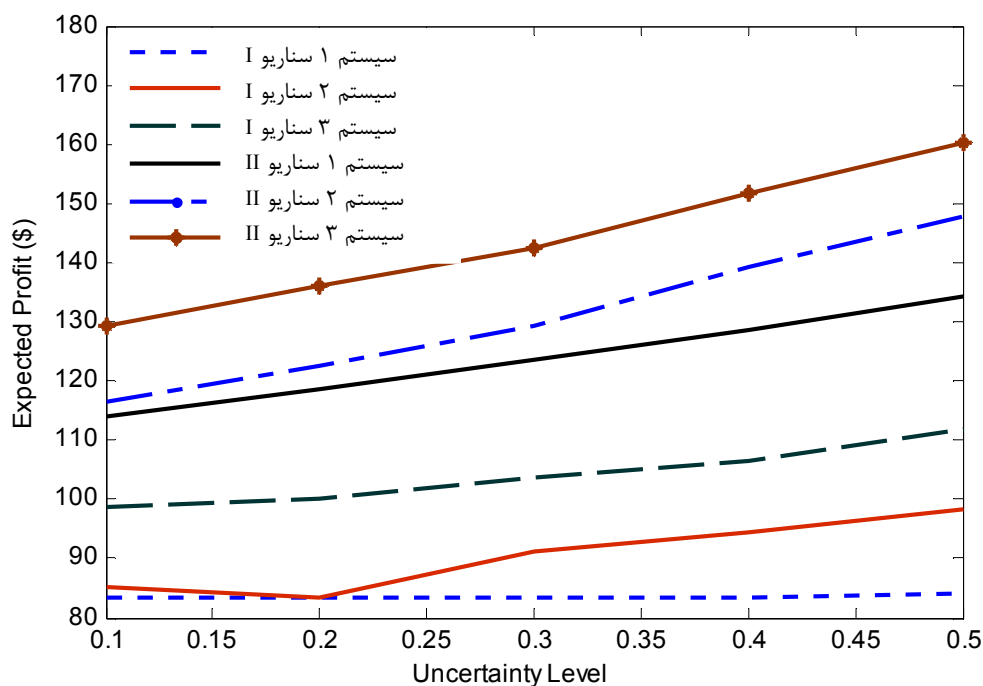
در شکل ۵-۱۲، تابع قابلیت اطمینان برای تمام سیستم‌ها و تحت عدم قطعیت ۳۰ درصدی نمایش داده شده است. به عنوان مثال در شرایطی که خودروهای الکتریکی وجود ندارند، احتمال آن که سود بهره‌برداری در سیستم‌های ۱، ۲ و ۳ بیشتر از ۱۲۰ دلار باشد، به ترتیب عبارتست از ۰/۵۸، ۰/۷۶ و ۰/۹۸. این موضوع می‌تواند بیانگر سود مورد انتظار بیشتر برای سیستم ۳ باشد. همچنین مشخص است که حضور خودروهای الکتریکی قابلیت اطمینان سود بهره‌برداری ریزش‌بکه را افزایش داده است.



شکل ۵-۱۲. توابع قابلیت اطمینان برای تمام سیستم‌ها تحت شرایط عدم قطعیت ۳۰ درصدی

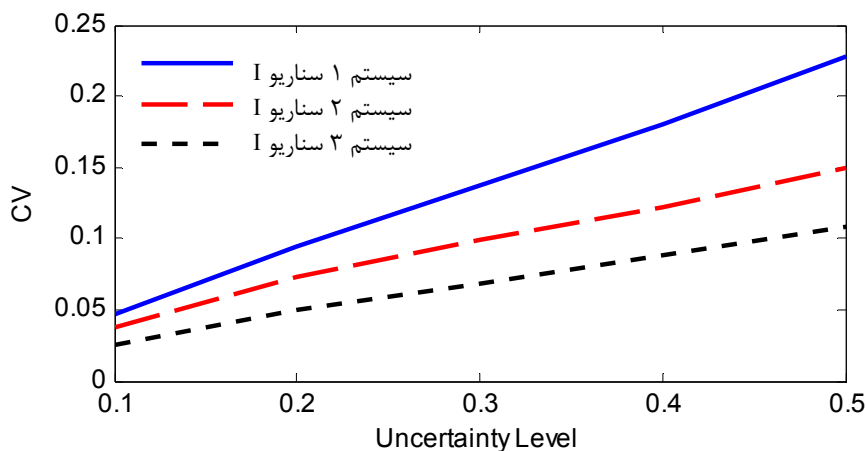
۵-۷-۳ نتایج آنالیز حساسیت

به منظور انجام آنالیز حساسیت، برای سیستم‌های مختلف تحت سطوح مختلف عدم قطعیت، شبیه‌سازی انجام شده و نتایج استخراج شده‌اند. شکل ۵-۱۳ نتایج مربوط به سود مورد انتظار سیستم‌های مختلف در سناریوهای حضور و عدم حضور خودروهای الکتریکی و تحت شرایط عدم قطعیت قیمت را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی می‌توانند سود مورد انتظار بهره‌برداری از ریزش‌بکه را افزایش دهند که مطابق با نتایج حاصل از بخش ۵-۷-۱ می‌باشد.



شکل ۵-۱۳. سود مورد انتظار تحت شرایط مختلف عدم قطعیت

همچنین شکل ۵-۱۴ ضریب تغییر را برای سه سیستم بدون حضور خودروهای الکتریکی را نشان می‌دهد. کاملاً واضح است تحت شرایطی که ریزش شبکه منعطف‌تر می‌باشد، ضریب تغییر کم‌تر است؛ این در حالیست که طبق شکل ۵-۱۳، سود بیشتری نیز مورد انتظار می‌باشد. همچنین قابل مشاهده است که در سطوح بالاتر عدم قطعیت، مقدار رشد ضریب تغییر برای سیستم‌های با انعطاف‌پذیری کم‌تر مانند سیستم ۱، بسیار زیاد می‌شود.

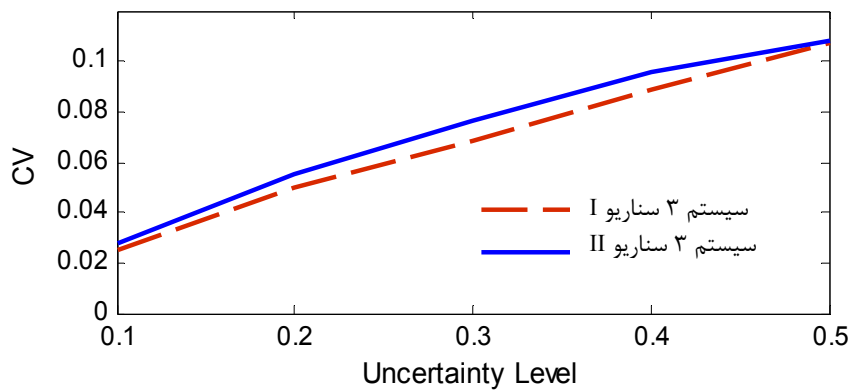
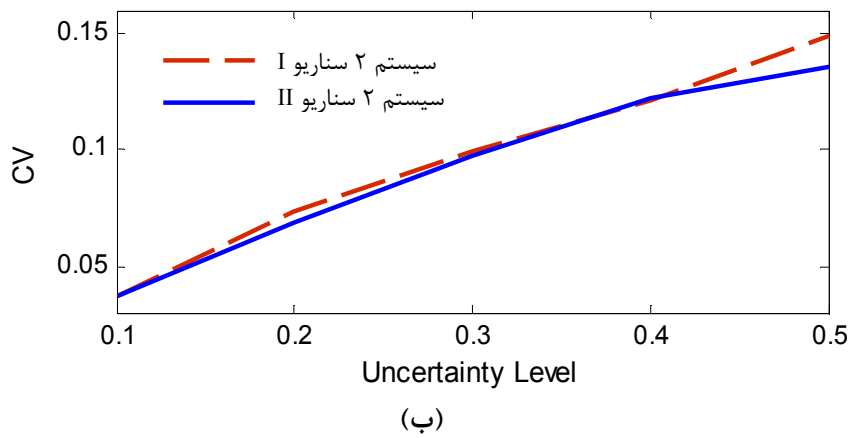
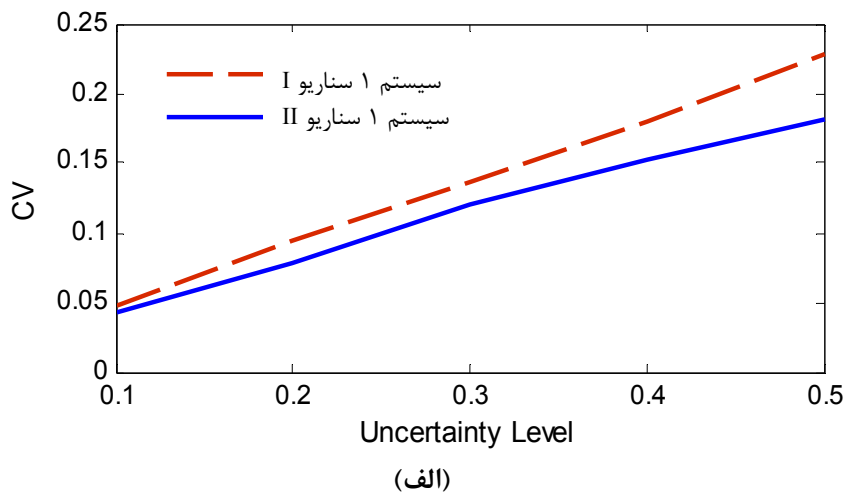


شکل ۵-۱۴. نمودارهای ضریب تغییر برای سطوح مختلف عدم قطعیت

به منظور بررسی تاثیر حضور خودروهای الکتریکی، ضریب تغییر برای سیستم‌های مختلف محاسبه شده و در شکل ۵-۱۵ آورده شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، با حضور خودروهای الکتریکی تغییر قابل توجهی در ضریب تغییر سیستم‌های ۲ و ۳ مشاهده نمی‌شود؛ در حالی که در سیستم ۱ شاهد کاهش مقدار ضریب تغییر هستیم. طبق شکل‌های ۵-۱۳ و ۵-۱۵ و تحت شرایط استفاده از مدیریت انرژی در ریزشبکه، می‌توان نتیجه گرفت که حضور خودروهای الکتریکی می‌تواند سود مورد انتظار را افزایش دهد؛ این در حالیست که تغییر قابل ملاحظه‌ای را بر روی ریسک ایجاد نمی‌کند.

۵-۸ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این بخش تاثیرات عدم قطعیت قیمت انرژی بر روی بهره‌برداری از ریزشبکه‌ی انرژی مورد بررسی قرار گرفت. تحت شرایط عدم قطعیت، سود بهره‌برداری شبکه دارای ریسک می‌باشد. با توجه به این موضوع، به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو سطوح مختلف عدم قطعیت قیمت مدل‌سازی شد و تاثیر آن بر روی برنامه‌ریزی بهینه‌ی انرژی در ریزشبکه مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین تاثیرات اضافه شدن DG و خودروی الکتریکی در مواجهه با عدم قطعیت قیمت نیز مورد بررسی قرار گرفتند. برای کمی‌سازی ریسک مربوط به سود بهره‌برداری، از معیار ضریب تغییر (CoV) استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که DGها می‌توانند سود مورد انتظار بهره‌برداری را افزایش داده و مقدار ریسک مرتبط با آن را کاهش دهند. علاوه بر این، اضافه شدن خودروهای الکتریکی می‌تواند سود مورد انتظار را افزایش دهد در حالی که تغییر چندان زیادی را در ریسک ایجاد نمی‌کنند. البته باید در نظر داشت که اضافه شدن خودروهای الکتریکی به شبکه، خود می‌تواند عدم قطعیت‌هایی مانند زمان ورود/خروج خودروها از پارکینگ را به برنامه‌ریزی اضافه کند. باید توجه داشت که در نظر گرفتن این قبیل موارد می‌تواند تحلیل‌ها را تحت تاثیر قرار دهد.



شکل ۵-۱۵. مقایسه‌ی میان نمودارهای ضریب تغییر در دو سناریوی مختلف: با حضور و بدون حضور خودروهای الکتریکی

الف) سیستم ۱ (ب) سیستم ۲ و ج) سیستم ۳

نتیجہ گیری و پیشنهادات

۱-۶ نتیجه‌گیری

افزایش بکارگیری منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازها و همچنین حضور بارهایی مانند خودروهای الکتریکی در شبکه‌های توزیع، موجب شده است تا مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی در این قبیل شبکه‌ها دستخوش تغییراتی شود. به همین دلیل طی سالیان اخیر، مساله‌ی مدیریت انرژی در شبکه‌های هوشمند همواره مورد توجه قرار گرفته است. با اعمال مدیریت انرژی، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری واحدهای تولید و مصرف انرژی به گونه‌ای انجام می‌شود تا اهدافی مانند اهداف اقتصادی برآورده شوند.

با توجه به توسعه‌ی مفاهیمی مانند ریزشبکه و هوشمندسازی شبکه‌های انرژی و همچنین اضافه شدن خودروهای الکتریکی با قابلیت V2G، مساله‌ی مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی در این قبیل شبکه‌ها در این رساله مورد بررسی قرار گرفت. در راستای رسیدن به اهداف رساله، ابتدا مدل ریاضی مربوط به مساله‌ی مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. خودروهای الکتریکی مدرن با قابلیت V2G این پتانسل را دارند تا در برخی اوقات به عنوان یک منبع ذخیره‌ی انرژی توسط شبکه مورد استفاده قرار بگیرند. بنابراین، این بارها می‌توانند به حل برخی از مشکلات شبکه کمک کنند. با شبیه‌سازی بر روی یک سیستم نمونه نشان داده شد که می‌توان توسط مدیریت انرژی خودروهای الکتریکی، زمان‌های شارژ/دشارژ خودروها را با توجه به قیمت انرژی (پرباری و کم‌باری شبکه) در طول شبانه‌روز جابجا نمود. همچنین در ادامه، مساله‌ی مدیریت انرژی در سطحی پیشرفته‌تر و برای یک ریزشبکه با حضور خودروهای الکتریکی بیان شد که عدم قطعیت تولید نیز در آن لحاظ گردید. با توجه به این امر و به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت در مساله‌ی مدیریت انرژی، برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای پیشنهاد داده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که بهره‌بردار ریزشبکه این انگیزه را دارد تا در برخی اوقات از پتانسل خودروهای الکتریکی بهره بگیرد و هزینه‌های

خود را کاهش دهد. همچنین نشان داده شد که به کمک برنامه‌ریزی پیشنهادی، بهره‌بردار می‌تواند اثرات عدم قطعیت بار و تولید را در تصمیمات خود لحاظ نموده و قبل از شروع دوره‌ی بهره‌برداری برخی تصمیمات را به طور قطعی اتخاذ نماید.

در ادامه‌ی مطالعات، مفهوم هاب انرژی برای برنامه‌ریزی انرژی در یک ریزشکه مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از هاب انرژی، این قابلیت به برنامه‌ریزی اضافه شد که زیرساخت‌های مختلف انرژی را بتوان به صورت توأمان در برنامه‌ریزی تأثیر داد. همچنین عدم قطعیت بار و تولید نیز در این مطالعه به کمک برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای در نظر گرفته شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که در بسیاری از زمان‌ها که قیمت انرژی الکتریکی نسبتاً بالاست، بهره‌بردار سیستم تمایل دارد تا از انواع دیگر حامل‌های انرژی مانند گاز طبیعی برای جبران کمبودهای تولید استفاده کند. همچنین نشان داده شد که بهره‌بردار می‌تواند در مورد برخی از متغیرهای برنامه‌ریزی به صورت قطعی تصمیم‌گیری کند؛ در حالی که تصمیمات مربوط به آینده را با توجه به سناریوی رخ داده به گونه‌ای تغییر می‌دهد تا حداقل هزینه حاصل شود. در ادامه‌ی مطالعات نیز تأثیر عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی بر روی بهره‌برداری از ریزشکه و همچنین نقش خودروهای الکتریکی بر روی تغییرات سود بهره‌برداری سیستم مورد بررسی قرار گرفت. برای مدل‌سازی قیمت با سطوح مختلف عدم قطعیت، از روش مونت کارلو استفاده شد. همچنین برای تحلیل ریسک مربوط به سود بهره‌برداری، معیار ضریب تغییر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که حضور خودروهای الکتریکی می‌تواند سود مورد انتظار ریزشکه را افزایش دهد؛ در حالی که بر روی ریسک ناشی از تغییرات سود، تأثیر منفی نمی‌گذارد.

۲-۶ پیشنهادات

در ادامه‌ی فعالیت‌های انجام شده در این رساله، می‌توان برخی موارد را برای تحقیقات بیشتر به صورت زیر بیان نمود.

- در این رساله، فتوولتاییک به عنوان منبع تولید مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به گسترش روزافزون فناوری‌های تولید پراکنده مانند توربین‌های بادی کوچک و بزرگ، می‌توان حضور این منابع را نیز در برنامه‌ریزی تصادفی انرژی اضافه نمود. البته عدم قطعیت ناشی از تولید باید به روش‌های مناسب مدل گردد.
- در برنامه‌ریزی تصادفی انرژی در ریزشبکه، همواره یک تجمیع‌کننده یا پارکینگ مربوط به خودروهای الکتریکی در نظر گرفته شده است که طی برنامه‌ریزی توسط بهره‌بردار، مقدار شارژ/دشارژ در هر زمان برای آن تعیین می‌شود. در اینجا می‌توان به کمک سیستم‌های چندعاملی، تعامل میان بهره‌بردار و تجمیع‌کننده را نیز مدل‌سازی نمود.
- نقش خودروهای الکتریکی در کاهش ریسک ناشی از عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی در این رساله مورد بررسی قرار گرفت. ورود خودروهای الکتریکی به شبکه خود می‌تواند عدم قطعیت‌های برنامه‌ریزی را بیشتر کند. در ادامه‌ی فعالیت‌های انجام شده در این رساله، می‌توان تغییرات سود بهره‌برداری ریزشبکه را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به خودروهای الکتریکی تحلیل نمود. اگر این عدم قطعیت‌ها با عدم قطعیت ناشی از تغییرات قیمت انرژی همراه شوند، تحلیل ریسک بهره‌برداری سیستم به احتمال زیاد دستخوش تغییراتی خواهد شد.

مراجع

- [1] 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, 2012, 27, (3), pp. 1628-1636.
- [2] IEA. 'CO2 emissions from fuel combustion highlights', (International Energy Agency, 2017.)
- [3] Ding Z., Lee, W. J.: 'A stochastic microgrid operation scheme to balance between system reliability and greenhouse gas emission', IEEE Trans. Industry Applications, 2016, 52, (2), pp. 1157-1166.
- [4] He, Y., Wang, L., and Wang, J., 'Handbook of CO₂ in power systems', (Springer Berlin Heidelberg, pp. 53-75, 2012.)
- [5] VDI-Guideline VDI 4602, page 3, Beuth Verlag, Berlin 2007.
- [6] Ghasemi, A., Asrari, A., Zarif, M., et al.: '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', Ren. & Sustain. Energy Rev., 2013, 28, pp. 456-462.
- [7] Aliasghari, P., Mohammadi-Ivatloo, B., et al.: 'Optimal scheduling of plug-in electric vehicles and renewable micro-grid in energy and reserve markets considering demand response program', J. Cleaner Production, 2018, 186, pp. 293-303.
- [8] Farzin. H., Fotuhi-Firuzabad, M., Moeini-Aghtaie, M.: 'A stochastic multi-objective framework for optimal scheduling of energy storage systems in microgrids', IEEE Trans. Smart Grid, 2017, 8, (1), pp. 117-127.
- [9] Ton, D. T., Smith M. A., 'The U.S. department of energy's microgrid initiative', The Electricity J., 2012. Vol. 25, no. 8, Pp. 84-94, 2012.
- [10] Mah, D., Hills, P., Li, V. O. K.: 'Smart grid applications and developments', (Springer-Verlag London press, 2014.)
- [11] Flick, T., Morehouse, J.: 'Securing the smart grid: next generation power grid security', (Synpress press, 1th ed, 2010.)
- [12] Dai, R., Mesbahi, M.: 'Optimal power generation and load management for off-grid hybrid power systems with renewable sources via mixed-integer programming', Energy Conv. & Manag., 2013, 73, pp. 234-244.
- [13] Tushar, M. H. K., Assi, C., et al. : 'Smart microgrids: optimal joint scheduling for electric vehicles and home appliances', IEEE Trans. Smart Grid, 2014, 5, (1), pp. 239 – 250.
- [14] Kang, M. A., Kim, Y. C., Ahmed, Y. C.: 'Communication Network Architectures for Smart-House with Renewable Energy Resource', Energies, 2015, 8, (8), pp. 8716-8735.
- [15] [Online]., www.energy.gov, accessed Oct. 2015.
- [16] Siang, F. T., Chee, W.T.: 'A review of energy sources and energy management system in electric Vehicles', Ren. Sustain. Energy Rev., 2013, 20, pp. 82-102.
- [17] [Online]. https://www.eia.gov/energyexplained/?page=us_energy_transportation. accessed Oct. 2015.
- [18] Tehran Air Quality Control. [Online]. HYPERLINK "<http://air.tehran.ir>" <http://air.tehran.ir>, accessed May 2016.
- [19] ElNozahy, M. S., Salama, M. M. A.: 'Studying the feasibility of charging plug-in hybrid electric vehicles using photovoltaic electricity in residential distribution systems', Electric Power Syst. Research, 2014, 110, pp. 133-143.
- [20] O'Connell, A., Flynn, D., Keane, A.: 'Rolling multi-period optimization to control electric vehicle charging in distribution networks', IEEE Trans. Power Syst., 2014, 29, (1), pp. 340 – 348.
- [21] Guan, X., Wu, J., et al.: 'Integrated energy exchange scheduling for multimicrogrid system with electric vehicles', IEEE Trans. Smart Grid, 2016, 7, (4), pp. 1762-1774.
- [22] Leou, R., Su, C.: 'Stochastic analyses of electric vehicle charging impacts on distribution network', IEEE Trans. Power Syst., 2014, vol. 29, (3), pp. 1055 – 1063.
- [23] Lingwen, G., Topcu, U., Low, S.H.: 'Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging', IEEE Trans. Power Syst., 2013, 28, (2), pp. 940 – 951.
- [24] Yuchao, M. A., Houghton, T., et al.: 'Modeling the benefits of vehicle-to-grid technology to a power

- system', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2012, 27, (2), pp. 1012 – 1020.
- [25] Richardson, P., Flynn, D., et al.: 'Local versus centralized charging strategies for electric vehicles in low voltage distribution systems', *IEEE Trans. Smart Grid*, 2012, 3, (2), pp. 1020 – 1028.
- [26] Moshtagh, J., Shafie-khah, M., Catalão, J. P.S., et al.: 'Smart distribution system operational scheduling considering electric vehicle parking lot and demand response programs', *Electric Power Syst. Research*, 2018, 160, pp. 404-418.
- [27] ElNozahy, M.S., Salama, M.M.A.: 'A comprehensive study of the impacts of PHEVs on residential distribution networks', *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 2014, 5, (1), pp. 332–342.
- [28] Yang, L., Zhang, J., Qian, D.: 'Risk-aware day-ahead scheduling and real-time dispatch for plug-in electric vehicles', *Global Commun. Conf. (GLOBECOM), IEEE, Anaheim, CA, USA, 2012*, pp. 3026 – 3031.
- [29] Yong, J.Y., Ramachandramurthy, V.K., Tan, K.M., et al.: 'review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects', *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 49, pp. 365–385.
- [30] Shareef, H., Islam, M.M., Mohamed, A.: 'A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, 64, pp. 403–420.
- [31] Razeghi, G., Zhang, L., Brown, T., et al.: 'Impacts of plug-in hybrid electric vehicles on a residential transformer using stochastic and empirical analysis', *J. Power Sources*, 2014, 252, pp. 277–285.
- [32] Richardson, P., Flynn, D., Keane, A.: 'Local versus centralized charging strategies for electric vehicles in low voltage distribution systems', *IEEE Trans. Smart Grid*, 2012, 3, (2), pp. 1020 – 1028.
- [33] Sachan, S., Adnan, N.: 'Stochastic charging of electric vehicles in smart power distribution grids', *Sustain. Cities & Society*, 2018, 40, pp. 91-100.
- [34] Stroehle, P., Becher, S., Lamparter, S.: 'The impact of charging strategies for electric vehicles on power distribution networks', *2011 Int. Conf. the European Energy Market (EEM), Zagreb, 2011*, pp. 51-56.
- [35] Rao, S. S.: 'Engineering optimization: theory and practice', (John Wiley & Sons, 2010).
- [36] Bashash, S., Fathy, H.K.: 'Cost-optimal charging of plug-in hybrid electric vehicles under time-varying electricity price signals', *IEEE Trans. Intelligent Transport. Syst.*, 2014, 15, (5), pp. 1958-1968.
- [37] Dai, R., Mesbahi, M.: 'Optimal power generation and load management for off-grid hybrid power systems with renewable sources via mixed-integer programming', *Energy Conv. & Manag.*, 2013, 73, pp. 234–244.
- [38] Hoehne, C. G., Chester, M. V.: 'Optimizing plug-in electric vehicle and vehicle-to-grid charge scheduling to minimize carbon emissions', *Energy*, 2016, 115, pp. 646-657.
- [39] Banvait, H., Lin, X., Anwar, S., et al.: 'Plug-in hybrid electric vehicle energy management system using particle swarm optimization', *World Electric Vehicle J.*, 2009, 3, (3), pp. 1-11.
- [40] Esmaili, M., Rajabi, M.: 'Optimal charging of plug-in electric vehicles observing power grid constraints', *IET Gener. Transm. & Distrib.*, 2014, 8, (4), pp. 583-590.
- [41] Alipour, M., Mohammadi-Ivatloo, B., Moradi-Dalvand, M., et al.: 'Stochastic scheduling of aggregators of plug-in electric vehicles for participation in energy and ancillary service markets', *Energy*, 2017, 118, pp. 1168-1179.
- [42] Ruoyang, L., Qiuwei, W., Oren, S. S.: 'Distribution locational marginal pricing for optimal electric vehicle charging management', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2014, 29, (1), pp. 203 - 211.
- [43] Zeman, J., Papadimitriou, I.: 'Modeling and optimization of hybrid electric vehicles', *SAE Technical Paper*, 2012.
- [44] Lozano, A. P.: 'Intelligent energy management of electric vehicles in distribution systems', short MS thesis in electric power syst. and high voltage engineering, Alborg university, 2010.
- [45] Bashash, S., Fathy, H.K.: 'Cost-optimal charging of plug-in hybrid electric vehicles under time-varying electricity price signals', *IEEE Trans. Intelligent Transport. Syst.*, 2014, 15, (5), pp. 1958-1968.
- [46] Zhang, P., Qian, K., Zhou, C.: 'A methodology for optimization of power systems demand due to electric vehicle charging load', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2012, 27, (3), pp. 1628-1636.
- [47] Ortega-Vazquez, M. A.: 'Optimal scheduling of electric vehicle charging and vehicle-to-grid services at household level including battery degradation and price uncertainty', *IET Gener. Transm. & Distrib.*, 2014, 8, (6), pp. 1007-1016.
- [48] Saber, A.Y., Venayagamoorthy, G.K.: 'Resource scheduling under uncertainty in a smart grid with

- renewables and plug-in vehicles', *IEEE Syst. J.*, 2012, 6, (1), pp. 103-109.
- [49] Papadopoulos, P., Jenkins, N., Cipcigan, L.M., et al.: 'Coordination of the charging of electric vehicles using a multi-agent system', *IEEE Trans. Smart Grid*, 2013, 4, (4), pp. 1802-1809.
- [50] Shuang, G., Chau, K. T., Chunhua, L., et al.: 'Integrated energy management of plug-in electric vehicles in power grid with renewables', *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, 2014, 63, (7), pp. 3019-3027.
- [51] Fattahi Bandpey, M., Gorgani Firouzjahi, K.: 'Two-stage charging strategy of plug-in electric vehicles based on fuzzy control', *Computers & Operations Research*, 2018, 96, pp. 236-243.
- [52] Kennel, F., Gorges, D., Liu, S.: 'Energy management for smart grids with electric vehicles based on hierarchical MPC', *IEEE Trans. Indust. Informatics*, vol. 9, (3), pp. 1528-1537.
- [53] Khayyam, H., Bab-Hadiashar, A.: 'Adaptive intelligent energy management system of plug-in hybrid electric vehicle', *Energy*, 2014, 69, pp. 319-335.
- [54] Dextreit, C., Kolmanovsky, I.V.: 'Game theory controller for hybrid electric vehicles', *IEEE Trans. Control Syst. Tech.*, 2014, 22, (2), pp. 652-663.
- [55] Yang, Z., Li, K., Foley, A.: 'Computational scheduling methods for integrating plug-in electric vehicles with power systems: a review', *Renew. Sustain. Energy Rev*, 2015, 51, pp. 396-416.
- [56] Hytowitz, R.B., Hedman, K.W.: 'Managing solar uncertainty in microgrid systems with stochastic unit commitment', *Electric Power Syst. Research*, 2015, 119, pp. 111-118.
- [57] Gast, N., Tomozei, D., Le Boudec, J.Y.: 'Optimal generation and storage scheduling in the presence of renewable forecast uncertainties', *IEEE Trans. Smart Grid*, 2014, 5, pp. 1328-1339.
- [58] Hu, W., Su, C., Chen, Z., et. al., 'Optimal operation of plug-in electric vehicles in power systems with high wind power penetrations', *IEEE Trans Sustain. Energy*, 2013, 4, (1), pp. 577-585.
- [59] Zakariazadeh, A., Jadid, S., Siano P.: 'Integrated operation of electric vehicles and renewable generation in a smart distribution system', *Energy Conv. & Manag.*, 2015, 89, pp. 99-110.
- [60] Gast, N., Tomozei, D., Le Boudec, J.Y.: 'Optimal generation and storage scheduling in the presence of renewable forecast uncertainties', *IEEE Trans. Smart Grid*, 2014, 5, pp. 1328-1339.
- [61] Vahedipour-Dahraie, M., Rashidizadeh-Kermani, H., Najafi, H. R., et. al.: 'Stochastic security and risk-constrained scheduling for an autonomous microgrid with demand response and renewable energy resources', *IET Ren. Power Gen.*, 2017, 11, (14), pp. 1812-1821.
- [62] Alharbi T., Bhattacharya, K.: 'Optimal scheduling of energy resources and management of loads in isolated/islanded microgrids', *Canadian J. Electrical and Computer Engineering*, 2017, 40, (4), pp. 284-294.
- [63] Honarmand, M., Zakariazadeh, A., Jadid S.: 'Integrated scheduling of renewable generation and electric vehicles parking lot in a smart microgrid', *Energy Conv. & Manag*, 2014, 86, pp. 745-755
- [64] Zakariazadeh, M., Honarmand, A.: 'Self-scheduling of electric vehicles in an intelligent parking lot using stochastic optimization', *Jour. Franklin Inst.*, 2015, 352, pp. 449-467
- [65] Shankar, R., Marco, J.: 'Method for estimating the energy consumption of electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles under real-world driving conditions', *IET Intelligent Transport Syst.*, 2013, 7, (1), pp. 138-150.
- [66] Mohamed, A., Salehi, V., Mohammed, O.: 'Real-time energy management algorithm for plug-in hybrid electric vehicle charging parks involving sustainable energy', *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 2014, 5, (2), pp. 577-586.
- [67] Leterme, W., Ruelens, F., Claessens, B., et al.: 'A flexible stochastic optimization method for wind power balancing with phev's', *IEEE Trans. Smart Grid*, 2014, 5, (3), pp. 1238-1245.
- [68] Deckmyn, C., Van de Vyver, J., Vandoorn, T. L., et. al.: 'Day-ahead unit commitment model for microgrids', *IET Gener. Transm. & Distrib.*, 2017, 11, (1), pp. 1-9.
- [69] Saber, A. Y., Venayagamoorthy, G. K.: 'Resource scheduling under uncertainty in a smart grid with renewables and plug-in vehicles', *IEEE Syst. J.*, 2012, 6, (1), pp. 103-109.
- [70] Stadler, M., Marnay, C., Kloess, M., et al.: 'Optimal planning and operation of smart grids with electric vehicle interconnection', *J. Energy Engineering*, 2012, 138, (2), pp. 95-108.
- [71] Atzeni, I., Ordonez, L.G., Scutari, G., et al.: 'Demand-Side management via distributed energy generation and storage optimization', *IEEE Trans. Smart Grid*, 2013, 4, (2), pp. 866-876.
- [72] Erdinc, O.: 'Economic impacts of small-scale own generating and storage units, and electric vehicles under different demand response strategies for smart households', *Applied Energy*, 2014, 126, pp. 142-

- [73] Setlhaolo, D., Xia, X., Zhang, J.: ‘Optimal scheduling of household appliances for demand response’, *Electric Power Syst. Research*, 2014, 116, pp. 24-28.
- [74] Rastegar, M., Fotuhi-Firuzabad, M., Aminifar, F.: ‘Load commitment in a smart home’, *Applied Energy*, 2012, 96, pp. 45-54.
- [75] Geidl, M., Koepfel, G., et al.: ‘Energy hubs for the future’, *IEEE Power & Energy Mag.*, 2007, 5, (1), pp. 24 - 30.
- [76] Geidl, M., Andersson, G.: ‘Optimal power flow of multiple energy carriers’, *IEEE Trans. Power Syst.*, 2007, 22, (1), pp. 145-155.
- [77] Koepfel, G., and Andersson, G.: ‘Reliability modeling of multi-carrier energy systems Energy’, *Energy*, 2009, 34, pp. 235-244
- [78] Carradore, L., Turri, R.: ‘Modeling and simulation of multi-vector energy systems’, *Power Tech. Conf., IEEE, Bucharest, 2009, pp. 1-7.*
- [79] P. Favre-Perrod, ‘Hybrid energy transmission for multi-energy networks,’ *phD dissertation, ETH Zurich, 2008.*
- [80] [Online]., www.future-energy.ethz.ch, accessed Nov 2016.
- [81] Schulze, M., Friedrich, L., Gautschi, M.: ‘Modeling and optimization of renewables: applying the energy hub approach’, *Int. Conf. Sustain. Energy Tech., IEEE, pp. 83-88, Singapore, 2008, pp. 83-88.*
- [82] Chehreghani Bozchalui, M., Hashmi, S.A., Hassen, H, et al.: ‘Optimal operation of residential energy hubs in smart grids’, *IEEE Trans. Smart Grid*, 2012, 3, (4), pp. 1755-1766.
- [83] Pazouki, S., Haghifam, M.R.: ‘Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty’, *Elec. Power & Energy Syst.*, 2016, 80, pp. 219-239
- [84] Pazouki, S., Mohsenzadeh, A., Ardalan, S., Haghifam, MR.: ‘Optimal place, size, and operation of combined heat and power in multi carrier energy networks considering network reliability, power loss, and voltage profile’, *IET Gener., Transm. & Distrib.*, 2016, 10, (7), pp. 1615-1621.
- [85] Zhang, X., Shahidehpour, M.: ‘Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures’, *IEEE Trans. Smart Grid*, 2015, 6, (5), pp. 2302-2311.
- [86] Salimi, M., Ghasemi, H., Adelpour, M., Vaez-Zadeh, S.: ‘Optimal planning of energy hubs in interconnected energy systems: a case study for natural gas and electricity’, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, 9, (8), pp. 695–707.
- [87] Schulze, M., Friedrich, L., Gautschi, M.: ‘Modeling and optimization of renewables: applying the energy hub approach’, *Int. Conf. Sustain. Energy Tech., IEEE, 2008, pp. 83-88.*
- [88] Moeini-Aghtaie, M., Dehghanian, P., Fotuhi-Firuzabad, M., et al: ‘Multiagent genetic algorithm: an online probabilistic view on economic dispatch of energy hubs constrained by wind availability’, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 2013, 5, (2), pp. 699-708
- [89] Ghasemi, A., Hojjat, M., Javidi, M. H.: ‘Introducing a new framework for management of future distribution networks using potentials of energy hubs’. *2nd Iranian Conf. on Smart Grids (ICSG), Tehran, 2012, pp. 1-7.*
- [90] Paudyal, S., Cañizares, C. A., Bhatt, K.: ‘Optimal operation of industrial energy hubs in smart grids’, *IEEE Trans. Smart Grid*, 2015, 6, (2), pp. 684-694.
- [91] Jin, X., Mu, Y., Jia, H., et al.: ‘Optimal day-ahead scheduling of integrated urban energy systems’, *Appl. Energy*, 2016, 180, pp. 1-13.
- [92] Vahid-Pakdel, M.J., Nojavan, S., Mohammadi-ivatloo, B., et al.: ‘Stochastic optimization of energy hub operation with consideration of thermal energy market and demand response’, *Energy Conv. & Manag.*, 2017, 145, pp. 117-128
- [93] Aghtaie, M. M., Abbaspour, A., Fotuhi-Firuzabad, M.: ‘Optimized probabilistic PHEVs demand management in the context of energy hubs’, *IEEE Trans. Powe Delivery*, 2015, 30, (2), pp. 996-1006.
- [94] Zarif, M., Khaleghi, S., Javidi, M.H.: ‘Assessment of electricity price uncertainty impact on the operation of multi-carrier energy systems’, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, 9, (16), pp. 2586–2592.
- [95] Mohammadi, M., Noorollahia, Y., Mohammadi-ivatloo, B., et al.: ‘Energy hub: From a model to a concept – A review’, *Ren. & Sust. Energy Rev.*, 2017, 80, pp. 1512-1527, 2017.
- [96] Shapiro, A., Dentcheva, D., Ruszczyński, A.: ‘Lectures on stochastic programming: modeling and theory’, (Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009).

- [97] Chen, C., Duan, S., Cai, T., et al.: ‘Smart energy management system for optimal microgrid economic operation’, *IET Ren. Power Gen.*, 2010, 5, (3), pp. 258-267.
- [98] Birge, J. R., Louveaux, F.: ‘Introduction to stochastic programming’, (Springer Science&Business Media, 2011, 2nd edn.).
- [99] Ferris, M. C., Dirkse, S. P., Jagla, J. H., et al.: ‘An extended mathematical programming framework’, *Comp. & Chemic. Eng.*, 2009, 33, (12), pp. 1973–1982.
- [100] ‘GAMS development corporation. - A user’s guide’, [Online]., <https://www.gams.com/latest/docs/userguides/GAMSUsersGuide.pdf>, accessed September 2017
- [101] [Online]., "<https://www.vw.com/models/e-golf/>", accessed May 2015.
- [102] Leou, R., Su, C.: ‘Stochastic analyses of electric vehicle charging impacts on distribution network’, *IEEE Trans. Power Syst.*, 2014, vol. 29, (3), pp. 1055 – 1063.
- [103] Geidl, M.: ‘Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems’, *phD dissertation, ETH Zurich, 2007*.
- [104] Geidl, M., Andersson, G.: ‘Operational and structural optimization of multi-carrier energy systems’, *Int. Trans. Electrical Energy Syst.*, 2006, 16, (5), pp. 463–477.
- [105] Arroyo, J. M., Conejo, A. J.: ‘Optimal response of a thermal unit to an electricity spot market’, *IEEE Trans. on Power Syst.*, 2000, 15, (3), pp. 1098-1104.
- [106] Raahemifar, K., Alharbi, W.: ‘Probabilistic coordination of microgrid energy resources operation considering uncertainties’, *Electric Power Syst. Research*, 2015, 128, pp. 1-10.
- [107] ‘PJM energy market’, [Online]. www.pjm.com, accessed Jul 2016.
- [108] ‘U.S. energy information administration’, [Online]., www.eia.gov, accessed march 2017
- [109] ‘NASA surface meteorology and Solar Energy’, [Online]., <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- [110] Weron, R.: ‘Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future’, *Int. J. Forecasting*, 2014, 30, (4), pp. 1030-1081.
- [111] Zhang, R., Cheng, X., Yang, L.: ‘Energy management framework for electric vehicles in the smart grid: A three-party game’, *IEEE Communication Magaz.*, 2016, 54, (12), pp. 93-101.
- [112] Yamin, H., Li, Z., Shahidehpour, M.: ‘Market operations in electric power systems: forecasting, scheduling, and risk management’ (Wiley-IEEE Press, 2002, 1st edn.)
- [113] English, J., Hicks, B., Hrasky, S., Gyles, N.: ‘Personal financial management’ (Allen & Unwin, 2003, 2nd edn.)
- [114] da Silva, M., Shea A., Hartzell, H.: ‘MEMS reliability’ (Springer, 2011, 1st edn.)
- [115] [Online]., '<https://www.mathworks.com/help/stats/dfittool.html>', accessed Nov 2017.
- [116] Hoang, D. T., Wang, P., Niyato, D., Hossain, E.: ‘Charging and discharging of plug-in electric vehicles (PEVs) in vehicle-to-grid (V2G) systems: A Cyber Insurance-Based Model’, *IEEE Access*, 2017, 5, pp. 732-754.
- [117] Zhang L., Li, Y.: ‘Optimal management for parking-lot electric vehicle charging by two-stage approximate dynamic programming’, *IEEE Trans. Smart Grid*, 2017, 8, (4), pp. 1722-1730.
- [118] Neyestani, N., Damavandi, M. Y., Shafie-khah, M., et al. : ""Plug-In Electric Vehicles Parking Lot Equilibria With Energy and Reserve Markets", *IEEE Trans. Power Syst.*, 32, (3), pp. 2001-2016.

Abstract

Nowadays, the energy management is an important issue in the smart grid. The energy management decides to manage both energy production and energy consumption. This thesis addresses the energy management in smart microgrids with inclusion of electric vehicles (EVs). In this study, the energy management is undertaken from the smart microgrid owner point of view to optimize the corresponding objective function.

In this thesis, firstly, the energy scheduling of the EVs is presented to manage the charging/discharging time intervals. In the next stage, the energy management model is developed for a smart microgrid including DG units, renewable energy resources and EVs as a mixed-integer linear programming (MILP) problem. To address uncertainties, the energy management is modeled by a two-stage stochastic programming problem.

Then, the concept of energy hub is used in the energy management of a micro energy grid (MEG). In this regard, a two-stage stochastic MILP model is developed for the energy scheduling of an energy hub. A set of scenarios is considered for the uncertainties of loads and renewable energy resources. Finally, the impact of electricity price uncertainty on the MEG operation is investigated (considering DG units and EVs), to maximize the operating profit of the energy network. In this stage, the Monte Carlo simulation technique is employed to address the price uncertainty. In addition, in order to quantify the risk of operating profit variability, the coefficient of variation (CoV) criterion is utilized.

All of the proposed models and methods are simulated on several test systems to verify the capability of the proposed methods.

Keywords: Energy management, distributed generation, stochastic programming, electric vehicles.



Shahrood University of
Technology

Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Ph.D. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

Energy Management in a Smart Microgrid in the Presence of Electric Vehicles

By: Abolfazl Ghasemi

Supervisor:
Dr. Mahdi Banejad

Advisor:
Dr. Morteza Rahimiyan

July 2018