

یک روش احتمالی جدید برای برنامه ریزی تولید نیروگاه های مجازی چند ناحیه ای

سعید مولایی^{۱*}، زهرا مروج^۲

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۹۶/۰۹/۲۲، پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۸)

چکیده

ریزشبکه ها، نمونه ای عملی از مفهوم تولید غیرمتمرکز هستند. در این راستا، پس از تعیین فناوری های مناسب و ظرفیت اجزای تولید و ذخیره انرژی برای اهداف پدافندی، برنامه ریزی بهینه منابع در ریزشبکه ها دارای اهمیت ویژه ای است. از این رو، برنامه ریزی منابع تولید پراکنده و ذخیره سازی انرژی در قالب نیروگاه مجازی باهدف افزایش بهره وری این منابع مورد توجه اپراتورهای شبکه توزیع قرار گرفته است. این مقاله مدلی باهدف برنامه ریزی بهینه واحدهای تولید الکتریکی و حرارتی (در روز آتی) در یک نیروگاه مجازی مقیاس وسیع ارائه می نماید. این نیروگاه شامل تعدادی تولیدکننده ترکیبی الکتریکی-حرارتی و مصرف کننده شبکه توزیع در کنار پارکینگ خودروهای الکتریکی با قابلیت شارژ هوشمند، بویلرها، منابع تولید انرژی نو و ذخیره سازی انرژی است. حضور تعداد زیاد ذخیره سازیها به خصوص خودروهای الکتریکی در این نوع از ریزشبکه ها موجب افزایش تاب آوری سیستم در مقابل حملات خرابکارانه می شود. عدم قطعیت بارهای الکتریکی و حرارتی با یک برنامه ریزی احتمالاتی و عدم قطعیت رفتار خودروها با شبیه سازی مونت کارلو مدل شده است. شبیه سازیها در دو حالت (۱) بهره برداری عادی و (۲) جزیره ای پس از یک حمله خرابکارانه انجام شده است. الگوریتم بهینه سازی فاخته به کمک نرم افزار متلب برای انجام بهینه سازی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته اند.

کلیدواژه ها: نیروگاه مجازی، خودروهای الکتریکی، ذخیره ساز انرژی، تولید تجدیدپذیر، عدم قطعیت بار

A Novel Probabilistic Method for Generating Scheduling of Multi-Zone Virtual Power Plants

S. Molaei*, Z. Moravej

University of Semnan, S_molaei@semnan.ac.ir

(Received: 13/12/2017; Accepted: 09/03/2018)

Abstract

Microgrids are practical samples of the concept of decentralized power production. In this regard, after determination of appropriate technologies and the capacity of power generation and storage units for defensive objectives, the optimal scheduling of units in microgrids is of the critical importance. Thus, scheduling of distributed generations and energy storages in form of virtual power plant have gained significant attentions of both owner of these units and the operators of distributions aiming at increasing the system efficiency. This paper proposes a model for the optimal day-ahead scheduling of electrical and thermal units in a large scale virtual power plant. This plant includes a number of combined heat and power units, distribution consumers, a parking for plug-in hybrid electric vehicles with the ability to follow a smart charging pattern, boilers, renewable energy based generators and storage units. The presence of large number of storages, especially electrical vehicles, in these types of microgrids enhances the resiliency of the grids when encountering malicious attacks. Uncertainty associated with electrical and thermal loads is modeled using a probabilistic programming while Monte-Carlo simulation has been utilized to model uncertainty in the behavior of electrical vehicles. Simulations have accomplished in two scenarios: 1) normal and 2) islanding operation after a deliberate attack. MATLAB software and cuckoo optimization algorithm are used for optimization task in this paper.

Keywords: Virtual Power Plants, Electric Vehicles, Energy Storage, Renewable Generation, Load Uncertainty

۱. مقدمه

مسئله امنیت سیستم‌های قدرت به عنوان یکی از زیرساخت‌هایی که دارای نقشی حیاتی در پایداری اجتماعی و رشد اقتصادی کشورها است، همواره تحت تأثیر تهدیدات مختلفی چون حوادث طبیعی، تهدیدات تصادفی و عوامل نوظهور بوده است. در کنار این عوامل، محافظت از سیستم‌های قدرت در برابر تهدیدات خرابکارانه یکی دیگر از مواردی است که در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران در حوزه امنیت سیستم‌های قدرت قرار گرفته است [۱-۲]. افراد خرابکار همواره سعی در اتخاذ تاکتیک‌هایی به منظور انهدام تأسیسات مهم و شریان‌های حیاتی کشور داشته‌اند تا از این طریق سیستم‌های حفاظتی کشور مورد نظر را دچار خدشه و با صرف حداقل سرمایه بیش‌ترین خاموشی را به آن تحمیل نمایند. لذا ضروری است تا روش‌های بهره‌برداری اتخاذ گردد تا در صورت رخداد حوادث احتمالی آینده، صدمات وارده به زیرساخت‌ها و میزان خاموشی‌های سیستم حداقل گردد؛ که در این پژوهش به این مهم پرداخته خواهد شد.

کاردوکس و همکاران [۳] مفهوم جدیدی از نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن ذخیره‌سازهای انرژی، سیستم‌های تولید هم‌زمان الکتریکی - حرارتی^۱، منابع انرژی تجدیدپذیر، بارهای قابل قطع و هم‌چنین اشکال مختلفی از نسل میکروژنراتورها علاوه بر نیروگاه‌های مرسوم ارائه کردند. هم‌چنین لمباردی و همکاران [۴] نسخه‌ای تکامل‌یافته از الگوریتم خود را این بار باهدف تعیین ظرفیت ذخیره‌سازی بهینه در داخل نیروگاه مجازی و با در نظر گرفتن آنالیز حساسیت برای پارامترهای قیمت ارائه داده‌اند. اخیراً، رامسی و اوندی [۵] مدل نیروگاه مجازی جدید و چالش برانگیزی تحت عنوان نیروگاه مجازی مقیاس وسیع^۲ پیشنهاد دادند. در این تحقیق تولیدکنندگان توان، ذخیره‌سازها و منابع بار مختلفی در یک محدوده جغرافیایی بزرگ توزیع شده‌اند که هر یک دارای نقطه اتصال به شبکه عمومی هستند.

مسائل مشابهی توسط زدرلیک و همکاران [۶] با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و هم‌چنین زمانی و همکاران [۷] با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی حل شده است؛ اما در مقاله ارائه‌شده توسط زدرلیک و همکاران [۶] محدودیت‌های شبکه در نظر گرفته نمی‌شود؛ هم‌چنین امکان زمان‌بندی کاهش بار وجود ندارد. بااین حال، این مقاله یک سیستم شامل تنها یک نیروگاه حرارتی و دو منبع انرژی تجدیدپذیر با یک نقطه به اشتراک‌گذاری توان با شبکه عمومی را به عنوان سیستم مورد مطالعه در نظر می‌گیرد.

مقالات دیگری نیز تحقیقات خود را با اهداف افق‌های زمانی و پله‌های زمانی مختلف با استفاده از برنامه‌ریزی خطی اجرا نموده‌اند. رویز و همکاران [۸] بر روی استراتژی‌های بهینه برای کنترل بار در زمان واقعی متمرکز شده‌اند؛ در حالی که کاردوکس و همکاران [۳] تنها متوسط پارامترهای سالانه (هزینه‌ها، قیمت‌ها و تولید انرژی) را به منظور تعیین برنامه‌ریزی بهینه سالانه در نظر گرفته‌اند. مقالات قبلی مفهوم کنترل منطقه‌ای نیروگاه مجازی را به خوبی تشریح نمودند، اما حضور منابع انرژی تجدیدپذیر را در نظر نگرفته‌اند. پیش از این، کالدون و همکاران [۹] به کارگیری تعداد زیادی منابع تولید پراکنده در یک نیروگاه مجازی به منظور تولید و فروش هر دو صورت انرژی حرارتی و الکتریکی پیشنهاد کردند، اما تنها ذخیره‌سازی حرارتی در مطالعات موردی در نظر گرفته شده و قیمت انرژی و سوخت ثابت فرض شده بود. هم‌چنین، هیچ‌گونه عدم قطعیتی برای منابع در نظر گرفته نشده است.

در سال‌های اخیر خودروهای الکتریکی ترکیبی قابل اتصال به شبکه^۳ توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. به طوری که در بسیاری از تحقیقات حضور خودروهای الکتریکی نیز در نیروگاه‌های مجازی دیده شده است. وانگ و همکاران [۱۰] یک مدل نیروگاه مجازی با حضور خودروهای الکتریکی و توربین‌های بادی مقیاس وسیع پیشنهاد کرده‌اند. رفتار خودروها نیز با شبیه‌سازی مونت کارلو در این تحقیق مدل شده است. مدل‌سازی نیز بر روی یک شبکه ۱۱۸ شینه انجام شده و هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار آلودگی به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند. ژو و همکاران [۱۱] یک برنامه‌ریزی تصادفی برای نیروگاه مجازی با حضور واحدهای بادی، خورشیدی و خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت ارائه کرده‌اند. هم‌چنین رستمی و رئوفت [۱۲] یک روش جدید برای بهره‌برداری نیروگاه‌های مجازی برای شرکت در بازار روز آینده در نظر گرفته‌اند. عدم قطعیت تولید، مصرف و قیمت‌ها به کمک یک روش تصادفی مدل شده است. شبیه‌سازی مونت کارلو^۴ برای مدل‌سازی رفتار تصادفی خودروها نیز در این مقاله در نظر گرفته شده است. کاهلن و کاتر [۱۳] حضور خودروهای الکتریکی در یک نیروگاه مجازی به منظور تأمین رزرو مدل‌سازی کرده‌اند. در این مقاله برنامه‌ریزی به گونه‌ای اجرا شده است که خودروهای الکتریکی در ساعات وجود مازاد ظرفیت، شارژ و در پرباری به عنوان رزرو سیستم را تغذیه می‌کنند.

³ Hybrid Plug-In Electrical Vehicles

⁴ Monte-Carlo

¹ Combined Heat And Power Units

² Large-Scale Virtual Power Plant

آن دیده‌شده است

۲. فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی واحدها

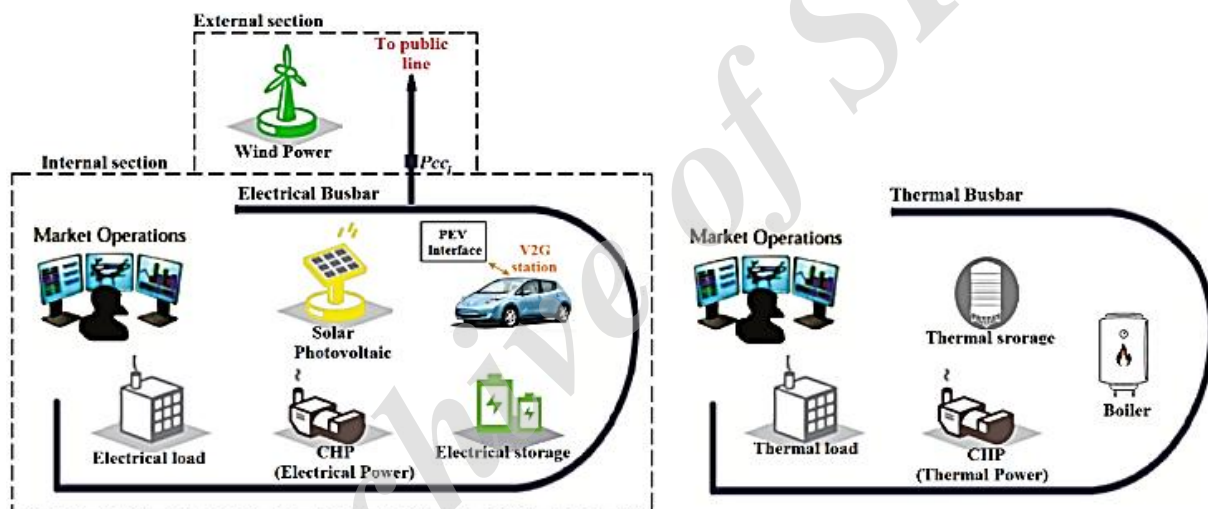
در این مقاله یک نیروگاه مجازی شامل چندین نیروگاه مجازی کوچک یکسان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲. توپولوژی و مدل هر یک از نیروگاه‌های مجازی

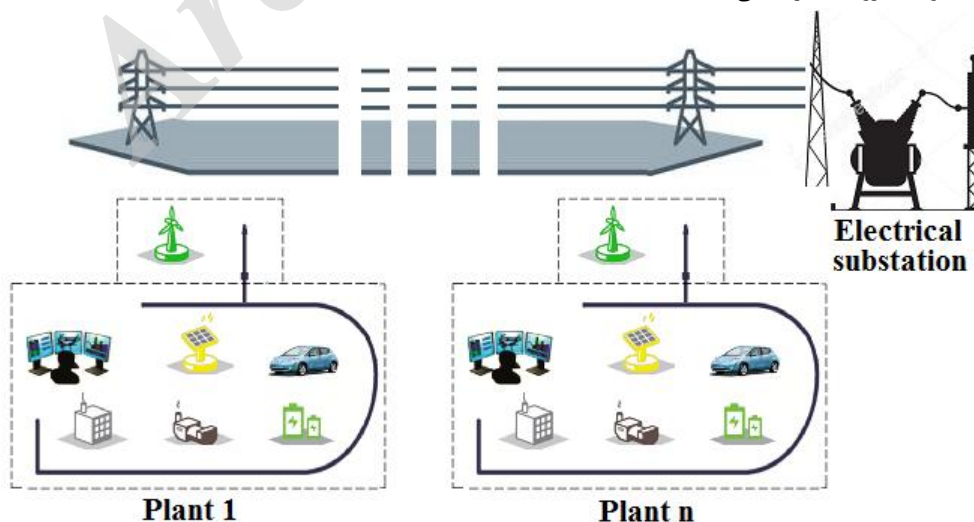
نیروگاه مجازی مورد بررسی در این مقاله مجموعه‌ای از واحدهای تولیدی هستند که به صورت جداگانه به یک شبکه توزیع شعاعی عمومی متصل شده‌اند و از طریق یک شین فرعی تغذیه می‌شوند. هر واحد نیروگاه مجازی به صورت شکل (۱) مدل‌سازی شده است. بهینه‌سازی برای نیروگاه مجازی مقیاس وسیع مطابق شکل (۲) مورد نظر خواهد بود.

گیونتولی و پولی [۱۴] نشان داده‌اند که چگونه واحد هماهنگ‌کننده زمان‌بندی تولید، می‌تواند مدیریت منابع انرژی خود را به منظور به حداکثر رساندن سود روزانه مجموعه (با توجه به قیمت فروش و خرید) انجام دهد. در حقیقت این مقاله یک الگوریتم جدید به منظور بهینه‌سازی برنامه‌ریزی نیروگاه مجازی را ارائه می‌دهد که هم‌زمان برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای تولیدی، ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی، خودروهای الکتریکی و پخش بار را اجرا می‌کند.

در این مقاله، یک الگوریتم بهینه‌سازی فاخته برای برنامه‌ریزی نیروگاه‌های مجازی چند ناحیه‌ای در بهره‌برداری نرمال و پس از یک حمله خرابکارانه (به صورت جزیره‌ای) در نظر گرفته شده است، به طوری که عدم قطعیت مصرف مشترکان در



شکل ۱. ساختار یک واحد نیروگاه مجازی تکی



شکل ۲. شبکه عمومی شامل n نیروگاه مجازی

۲-۲. ساختار تعرفه سیستم‌های تجدید ساختار شده

به منظور شکل‌دهی تعرفه برای سیستم‌های تجدید ساختار شده، مکانیزم قیمت‌گذاری زیر اجرا شده است.

- تعرفه فروش انرژی: هنگامی که توان تولیدشده داخلی (Pint) مقداری مثبت باشد، یعنی علاوه بر تأمین توان شبکه داخلی میزانی از انرژی را بتواند به شبکه بالادست بفروشد، علاوه بر قیمت اصلی انرژی فروش‌رفته، شایسته دریافت مقداری تعرفه تشویقی نیز خواهد بود.

- تعرفه خرید سوخت (معمولاً گاز طبیعی): علی‌رغم آن‌که در بازار حامل‌های انرژی، نوع مصرف مشترک بر قیمت خرید سوخت مؤثر است، در مورد نیروگاه‌های تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی بدون توجه به نوع مصرف حامل‌های انرژی، خواه برای تولید گرما و خواه برای تولید الکتریسیته، ترکیبی از دو قیمت به عنوان تعرفه تشویقی در نظر گرفته می‌شود [۱۵].

- طرح مشوق برای منابع انرژی تجدیدپذیر: طرح تشویقی برای منابع

انرژی تجدیدپذیر به صورت یک پرداخت اضافی به مجموع توان تولیدی آن‌ها داده می‌شود، خواه این مقدار صرف مصرف داخلی شود و یا به شبکه بالادست فروخته شود.

۲-۳. رفتار شارژ خودروهای الکتریکی

در این مقاله یک راه‌برد هوشمند برای شارژ خودروها در نظر گرفته شده است. ایده اصلی پشت تمام استراتژی‌های شارژ هوشمند آن است که شارژ خودرو در زمانی انجام گیرد که حداکثر سود را هم برای صاحب خودرو و هم برای بهره‌بردار شبکه داشته باشد. یک تابع توزیع نرمال برای نشان دادن پیچیدگی به‌کارگیری برنامه‌های مختلف شارژ هوشمند و تعیین زمان شروع شارژ به شرح زیر پیشنهاد شده است [۱۶]:

$$f(t_{start}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-0.5\left(\frac{t_{start}-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \mu=1, \sigma=3 \quad (1)$$

هنگامی که خودروهای الکتریکی ترکیبی قابل اتصال در خانه به شارژ متصل است، باتری شروع به شارژ می‌کند. وضعیت شارژ باقی‌مانده در باتری با دانستن مسافت طی‌شده روزانه توسط وسیله نقلیه در طول روز تعیین می‌گردد. مسیر طی شده توسط یک وسیله نقلیه به صورت یک تابع توزیع احتمال لگاریتمی ارائه می‌شود [۱۷]:

$$f(m) = \frac{1}{m\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-0.5\left(\frac{\ln(m)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad m > 0 \quad (2)$$

در این شبکه تنها توان اکتیو عناصر مورد بررسی قرار گرفته است و از برنامه‌ریزی توان راکتیو و تلفات خطوط انتقال چشم‌پوشی شده است. یکی از نکات مورد تأکید این مقاله آن است که در پژوهش حاضر یک نیروگاه مجازی تنها مورد بحث نخواهد بود؛ بلکه هر یک از واحدهای VPP تنها یک جزء از یک شبکه بزرگ‌تر هستند. از این‌رو با استفاده از اصطلاحات مطرح‌شده توسط رامسی و اوندی [۵]، تمرکز مطالعه حاضر بر روی یک نیروگاه مجازی وسیع، با در نظر گرفتن محل واقعی هر یک از منابع انرژی توزیع‌شده در شبکه است. بخش حرارتی مدل که به شینه سمت راست متصل شده است، یک بار شناخته‌شده و معین است که می‌تواند به دو طریق، یا توسط یک واحد نیروگاه تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی و یا توسط یک دیگ بخار و یک دستگاه ذخیره‌ساز حرارتی تغذیه شود. اگر تولید حرارتی یک واحد نیروگاه تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی که بیش از بار مورد نیاز شبکه است، به دلیل محدودیت‌های توان و یا انرژی توسط عنصر ذخیره‌ساز حرارتی جذب نشود، مازاد انرژی حرارتی^۱ (P_{sur}) با استفاده از یک مبدل حرارتی آزاد می‌شود. نیروگاه تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی و هم دیگ بخار دارای تغذیه گازی هستند. بخش الکتریکی شبکه خود به دو بخش دیگر تقسیم شده است. قسمت اول به نام بخش داخلی که شامل یک تولیدکننده خودکار متداول است و مرز آن با شبکه توزیع همان نقطه اتصال عمومی^۲ (PCC_i) است.

این بخش از مدل که مطابق شکل (۱) به شینه سمت چپ متصل می‌شود به طور عمده از یک مصرف‌کننده الکتریکی تشکیل شده است که می‌تواند توسط یک واحد نیروگاه تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی، یک منبع انرژی تجدیدپذیر داخلی و یا یک دستگاه ذخیره‌ساز الکتریکی تغذیه شود. بخش دوم نیز از یک تولیدکننده انرژی‌های تجدیدپذیر خارجی تشکیل شده است که به طور مستقیم می‌تواند به شبکه یا بخش داخلی انرژی بفروشد. منظور از منابع تجدیدپذیر داخلی واحدهای خورشیدی هستند که امکان نصب در نزدیکی و داخل مناطق شهری را دارا هستند، درحالی‌که مزارع بادی اکثرأ از جمله منابع تجدیدپذیری هستند که خارج از مناطق شهری احداث می‌گردند. البته استثنا نیز در این بحث وجود دارد، اما نویسندگان سعی بر آن داشته‌اند که با این سبک بیان هر دو نوع منابع داخل و خارج نیروگاه مجازی را در مدل‌سازی لحاظ کنند.

¹ Surplus Power

² Common Coupling Powerpoint

۴-۲. مدل‌سازی ریاضی عناصر و قیود شبکه

واحد تولید هم‌زمان الکتریکی - حرارتی (CHP): توان الکتریکی و متعاقب آن توان حرارتی یکی از متغیرهای اساسی است که باید توسط الگوریتم بهینه گردد. نرخ تبدیل گرما به الکتریسیته (λ) در این سیستم با یک ضریب ثابت انجام می‌شود.

$$P_{tch,pt}^s = \lambda_{chp,p} \cdot P_{echp,pt}^s \quad (۸)$$

خروجی انرژی الکتریکی سیستم تولید هم‌زمان طبق رابطه (۷) یا صفر و یا بین حداقل توان فنی و مقدار نامی است.

$$P_{echp-min,pt}^s \cdot U_{chp,pt}^s \leq P_{echp,pt}^s \leq P_{echp-max,pt}^s \cdot U_{chp,pt}^s \quad (۹)$$

که در اینجا $U_{chp,pt}^s$ وضعیت روشن و خاموش بودن واحدها است.

ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی: معادلات (۸) و (۹) محدودیت توان در طول عملیات شارژ و دشارژ را به ترتیب برای ذخیره سازهای الکتریکی و حرارتی بیان می‌کند.

معادلات (۱۰) و (۱۱) به حد پایینی و فوقانی انرژی ذخیره‌سازهای الکتریکی اشاره دارند.

$$\frac{(e_{es-start,p} - e_{es-max,p})}{\delta} \leq \eta_{es,p} \sum_{i=Ts}^t P_{es,pi}^s + \sum_{i=Ts}^t P_{es,pi}^s \quad (۱۰)$$

$$\eta_{es,p} \sum_{i=Ts}^t P_{es,pi}^s + \sum_{i=Ts}^t P_{es,pi}^s \leq \frac{(e_{es-start,p} - e_{es-min,p})}{\delta} \quad (۱۱)$$

معادلات (۱۲) و (۱۳) مربوط به ذخیره‌سازهای حرارتی هستند. به منظور در نظر گرفتن بهره‌وری انرژی در چرخه بهره‌برداری، مراحل شارژ و دشارژ به طور کامل مجزا در نظر گرفته شده است.

$$\frac{(e_{ts-start,p} - e_{ts-max,p})}{\delta} \leq \eta_{ts,p} \sum_{i=Ts}^{Te} P_{ts,pi}^s + \sum_{i=Ts}^{Te} P_{ts,pi}^s \quad (۱۲)$$

$$\eta_{ts,p} \sum_{i=Ts}^{Te} P_{ts,pi}^s + \sum_{i=Ts}^{Te} P_{ts,pi}^s \leq \frac{(e_{ts-start,p} - e_{ts-min,p})}{\delta} \quad (۱۳)$$

T_s و T_e به ترتیب آغاز و پایان افق زمان شبیه‌سازی است. در پایان دوره روزانه شبیه‌سازی، سطح انرژی اولیه در همه ذخیره‌سازها باید معادل با مقدار اولیه در ابتدای دوره بهره‌برداری گردد:

در نتیجه وضعیت شارژ باتری با استفاده از مسافت طی شده خودرو و محدوده تمام الکتریکی آن محاسبه می‌گردد:

$$SOC = \begin{cases} 0 & m > AER \\ \frac{AER - m}{AER} \times 100\% & m \leq AER \end{cases} \quad (۳)$$

انواع مختلف خودروهای الکتریکی ترکیبی قابل اتصال به شبکه، بر اساس محدوده تمام الکتریکی آن‌ها وجود دارد، به‌عنوان مثال PHEV-20، PHEV-30، PHEV-40 و PHEV-60 که در آن‌ها اندیس عددی نشان‌دهنده محدوده تمام الکتریکی خودرو بر حسب مایل است. بر اساس استاندارد انرژی در بحث خودروهای الکتریکی، محدوده تمام الکتریکی (AER) بیانگر محدوده رانندگی یک وسیله نقلیه تنها با استفاده از توان باطری الکتریکی آن است. در مورد باتری وسیله نقلیه الکتریکی، به معنی محدوده کل قابل رانندگی به‌ازای هر بار شارژ کامل است. این مطالعه PHEV-20 را به‌عنوان نوعی که در طول زمان پتانسیل بالای

$$-P_{es-char,p} \leq P_{es,pt}^s \leq P_{es-disc,p} \quad (۴)$$

$$-P_{ts-char,p} \leq P_{ts,pt}^s \leq P_{ts-disc,p} \quad (۵)$$

مصرف آن در بازار اثبات شده است، در نظر می‌گیرد [۱۸]. مدت زمان شارژ خودروهای الکتریکی ترکیبی قابل اتصال می‌تواند با توجه به فرمول زیر محاسبه گردد:

$$t_D = \frac{C_{bat} \times (1 - SOC) \times DOD}{\eta \times P} \quad (۶)$$

لازم به ذکر است زمانی که خودروهای الکتریکی ترکیبی قابل اتصال به خانه می‌رسند، بسته به نیاز خود و با توجه به محدودیت بیش‌ترین عمق تخلیه (حدود ۸۰٪ گزارش شده است [۱۸]) شارژ شروع می‌شود، اما مدت زمان شارژ توسط سطح عملکرد شارژر (P) و راندمان (η) شارژر محدود می‌شود. نرخ شارژ همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده است، توسط سطح شارژر تعیین می‌شود. توزیع ظرفیت باتری‌ها C_{bat} در محدوده داده شده برای هر کلاس به صورت یک توزیع نرمال احتمال با پارامترهای در نظر گرفته شده به شرح زیر است [۱۸ - ۱۷]:

$$\mu_{C_{bat}} = \frac{MinC_{bat} + MaxC_{bat}}{2} \quad (۷)$$

$$\sigma_{C_{bat}} = \frac{MaxC_{bat} - MinC_{bat}}{4}$$

جدول ۱. انواع مختلف شارژر PHEV

نوع شارژر	ورودی ولتاژ	حداکثر توان (kw)
سطح ۱	VAC ۱۲۰	۱/۴۴
سطح ۲	VAC ۲۰۸ - ۲۴۰	۱۱/۵
سطح ۳	VAC ۲۰۸ - ۲۴۰	۹۶
سطح ۴ (DC)	VDC ۲۰۸ - ۶۰۰	۲۴۰

پس از حمله هدفمندانه به صورت جزیره‌ای در حال اجرا باشد، حد مجاز توان آخرین خط که متصل به پست نیز هست باید صفر باشد:

$$P_{lin, Npt=0} \quad (23)$$

تعداد توان‌های الکتریکی و حرارتی: با توجه به شکل (۱) و روابط (۲۴) و (۲۵) توازن توان در شینه‌های داخلی و خارجی به صورت زیر خواهند بود.

$$P_{int, pt}^s = P_{echp, pt}^s + P_{ires, pt}^s + P_{es, pt}^s + P_{eens, pt}^s + P_{PHEV, pt}^s - P_{el, pt}^s \quad (24)$$

$$P_{lin, Npt}^s = P_{int, pt}^s + P_{eres, pt}^s + \sum_{i=1}^{p-1} (P_{int, it}^s + P_{eres, it}^s) \quad (25)$$

در روابط قبل، محاسبه شارش توان از واحد نیروگاه مجازی یک شروع می‌شود. هم‌چنین قید تعادل توان حرارتی به صورت زیر است.

$$P_{tl, pt}^s = \lambda_{chp, p} P_{echp, p}^s + P_{bil, pt}^s + P_{ts, pt}^s - P_{sur, pt}^s \quad (26)$$

$$P_{sur, pt}^s \geq 0$$

۲-۵. تابع هدف

تابع هدف سود کل نیروگاه‌های مجازی را حداکثر می‌کند. در این راستا موارد زیر در نظر گرفته می‌شوند.

هزینه خرید و فروش انرژی در نقطه PCC_i : در هر واحد از نیروگاه مجازی، میزان سود و هزینه ناشی از خرید و فروش انرژی (C_{pcci}) وابسته به توان مبادله شده در نقطه اتصال مشترک (PCC_i) و قیمت خرید و فروش انرژی است.

$$P_{int, pt}^s > 0 \Rightarrow C_{pcci, pt}^s = \delta C_{es, h} P_{int, pt}^s \quad (27)$$

$$P_{int, pt}^s < 0 \Rightarrow C_{pcci, pt}^s = \delta C_{ep, h} P_{int, pt}^s$$

سود مشوق برای واحد RES: در نقطه اتصال مشترک (PCC_e)، توان تولیدی توسط واحد انرژی تجدیدپذیر خارجی ($ERES$) در صورتی که به صورت کامل به شبکه فروخته شود، شامل سود ذیل (c_{pcee}) خواهد شد:

$$C_{pcee, pt}^s = \delta C_{eres, h} P_{eres, pt}^s \quad (28)$$

علاوه بر آن، واحد انرژی تجدیدپذیر داخلی ($IRES$) متناسب با میزان تولید، خواه فروخته شده به شبکه و خواه مصرف داخلی، شامل سود اضافی به شرح ذیل خواهد شد.

$$C_{icce, pt}^s = \delta C_{ires, h} P_{ires, pt}^s \quad (29)$$

هزینه سوخت: هزینه سوخت مصرف شده برای تولید برق ($c_{gg, h}$) به دلیل وجود مالیات از هزینه برای تولید گرما ($c_{gh, h}$)

$$\eta_{es, p} \sum_{\substack{i=Ts \\ char}}^{Te} P_{es, pi}^s + \sum_{\substack{i=Ts \\ dischar}}^{Te} P_{es, pi}^s = 0 \quad (14)$$

$$\eta_{ts, p} \sum_{\substack{i=Ts \\ char}}^{Te} P_{ts, pi}^s + \sum_{\substack{i=Ts \\ dischar}}^{Te} P_{ts, pi}^s = 0 \quad (15)$$

اگر انرژی نهایی مورد نظر در انتهای دوره بهره‌برداری متفاوت از مقدار اولیه شود، به عنوان مثال در وضعیتی که الگوریتم برای شبیه‌سازی کمتر از ۲۴ ساعت به کار گرفته شود، دو معادله قبلی تبدیل به روابط زیر خواهند شد:

$$\eta_{es, p} \sum_{\substack{i=Ts \\ char}}^{Te} P_{es, pi}^s + \sum_{\substack{i=Ts \\ dischar}}^{Te} P_{es, pi}^s = \frac{(e_{es-start, p} - e_{es-final, p})}{\delta} \quad (16)$$

$$\eta_{ts, p} \sum_{\substack{i=Ts \\ char}}^{Te} P_{ts, pi}^s + \sum_{\substack{i=Ts \\ dischar}}^{Te} P_{ts, pi}^s = \frac{(e_{ts-start, p} - e_{ts-final, p})}{\delta} \quad (17)$$

منابع انرژی تجدیدپذیر داخلی و خارجی: توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر داخلی و خارجی را می‌توان با توجه به مقادیر پیش‌بینی شده توان خورشیدی و بادی در هر ساعت محدود کرد:

$$0 \leq P_{ires, pt}^s \leq P_{ires-max, pt} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{eres, pt}^s \leq P_{eres-max, pt} \quad (19)$$

از آنجا که انرژی تولیدشده توسط منابع انرژی تجدیدپذیر بالاترین قیمت در بازار انرژی تحویل می‌شوند، الگوریتم بهینه‌سازی تنها تحت شرایطی که در آن‌ها با تولید بیش از حد و یا تراکم شدید در شبکه و خطوط مواجه هستیم، منابع تجدیدپذیر را قطع می‌کند.

دیگ بخار^۱ (بویلر): یک دیگ بخار زمانی وارد عمل می‌شود که واحد CHP و ذخیره‌ساز حرارتی قادر به پاسخگویی کامل به بار حرارتی نباشند. توان حرارتی توسط دیگ بخار باید در محدوده ظرفیت این واحد قرار گیرد:

$$0 \leq P_{boil, pt}^s \leq P_{boil-max, pt} \quad (20)$$

قطع بار: در صورتی که پاسخگویی به تمام تقاضای مصرف مقدور نباشد، به دلیل محدودیت‌های شدید شبکه و همچنین ناکافی بودن تولید داخلی، یک کاهش بار عمدی به صورت محدودسازی یک بخش از تقاضای توان الکتریکی تا حداکثر حد γ برنامه‌ریزی می‌شود.

$$0 \leq P_{sens, pt}^s \leq \gamma P_{el, pt} \quad (21)$$

قیود شبکه: جریان خطوط انتقال نایبستی از حد مجاز حرارتی خط تجاوز کند:

$$|P_{lin, pt}^s| \leq P_{lin-max, pt} \quad (22)$$

² External Renewable Energy Source

¹ Boiler

جدول ۲. توزیع گسسته احتمالات بار برای زمان‌بندی ۲۴ ساعته

شماره سناریو	احتمالات	بار مورد انتظار ساعت ۱ تا ۱۲	بار مورد انتظار ساعت ۱۳ تا ۲۴
سناریو ۱	۰/۶	۱۰۰٪	۱۰۰٪
سناریو ۲	۰/۱۵	۹۸/۵٪	۹۸٪
سناریو ۳	۰/۱۵	۱۰۲٪	۱۰۳٪
سناریو ۴	۰/۰۵	۹۸٪	۹۷٪
سناریو ۵	۰/۰۵	۱۰۰٪	۱۰۴٪

۲-۷. روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم فاخته

در سال‌های اخیر علاوه بر روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی ترکیب اعداد صحیح (MIP)، با پیشرفت علوم کامپیوتری در حوزه محاسبات با ابعاد بالا، روش‌های مبتنی بر تکنیک‌های ابتکاری و فرآیندهای تکاملی بیش از پیش مورد توجه محققان سیستم قدرت قرار گرفته است [۲۴-۲۱]. در این مقاله الگوریتم فاخته برای بهینه‌سازی پارامترهای مسئله به خدمت گرفته شده است [۲۱].

۳. شبیه‌سازی و نتایج

در مطالعه حاضر یک نیروگاه مجازی شامل پنج ناحیه در نظر گرفته شده است. برنامه‌ریزی واحدهای هر یک از نیروگاه‌ها برای دوره‌های یک‌ساعته شبیه‌سازی می‌شود. جزئیات ساختاری هر یک از نیروگاه‌های مجازی ارائه شده توسط گیونتولی و پولی [۱۴] تشریح شده است. واحد پارامترهای توان kW و انرژی kWh است. برای مدل‌سازی رفتار خودروها از شبیه‌سازی مونت کارلو در هر سناریوی مورد مطالعه، استفاده شده است. میانگین و انحراف معیار مسافت روزانه طی شده توسط خودروهای الکتریکی ترکیبی قابل اتصال به شبکه به ترتیب ۳۳ مایل و ۲۰/۴ مایل فرض می‌شود [۱۷]. در این مقاله سطح ۲ شارژرها مطابق جدول (۱) استفاده شده است. فرض بر آن است که در هر یک از پنج نیروگاه مجازی به علت محدودیت تعداد شارژرها و فن‌آوری اتصال خودروها در هر ساعت حداکثر تعداد ۱۵ خودرو امکان حضور خواهند داشت. مشخصات بازار و تقاضای مصرفی برای هر یک از نیروگاه‌های مجازی برای افق بهره‌برداری ۲۴ ساعت در جدول (۳) نشان داده شده است. در مطالعات موردی این مقاله، قیمت سوخت گاز $C_{gh,h}$ برای تولید حرارت $\$/m^3$ ۰/۳۶۸ و قیمت سوخت گاز $C_{gg,h}$ برای تولید برق $\$/m^3$ ۰/۳۴۹ در نظر گرفته شده است [۱۴]. هزینه سوخت واحد تولید هم‌زمان الکتریکی - حرارتی از توابع زیر محاسبه می‌شود:

است [۱۹]. هزینه سوخت (C_{ttc}) در واحد p و زمان t را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$C_{ttc,pt}^S = C_{boil,pt}^S P_{boil,pt}^S + C_{chp,pt}^S P_{echp,pt}^S \quad (30)$$

که در اینجا:

$$C_{boil,pt} = -\frac{\delta}{\eta_{boil,p}} f_{boil}(C_{gh,h}) \quad (31)$$

$$C_{chp,pt} = -\delta f_{chp}(C_{gh,h}, C_{gg,h}) \quad (32)$$

در روابط بالا، تابع f_{boil} توان $C_{gh,h}$ را به هزینه تبدیل می‌کند. در صورتی که تابع f_{chp} هر دو پارامتر $C_{gh,h}$ و $C_{gg,h}$ را در نظر می‌گیرد. هزینه راه‌اندازی نیز برای واحدهای تولید هم‌زمان الکتریکی - حرارتی کوچک قابل صرف نظر است.

هزینه ریسک: هزینه قطع بار عمدی و از پیش برنامه‌ریزی شده دارای جریمه‌های بسیار بالا است. برای جلوگیری از چنین رخدادهایی، این هزینه به صورت زیر فرمول‌بندی شده است:

$$C_{sens,pt}^S = -\delta C_{sens,h} P_{sens,pt}^S \quad (33)$$

فرم نهایی تابع هدف: سود نهایی حاصل از بهره‌برداری کل واحدها در کل بازه برنامه‌ریزی تولید به صورت رابطه زیر نشان داده شده است:

$$\zeta = \max \sum_{u=Ts}^{Te} \sum_{h=1}^{Np} \left(C_{pcc,hu}^S + C_{pcc_e,hu}^S + C_{ires,hu}^S + C_{ttc,hu}^S + C_{sens,hu}^S \right) \quad (34)$$

۲-۶. مدل‌سازی عدم قطعیت در تقاضای بار مصرفی

در سال‌های اخیر روش‌های بسیاری به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت به خدمت گرفته شده است. از جمله این روش‌ها روش درخت احتمال یا درخت تصمیم است که در صورت تعیین دقیق پارامترهای دارای عدم قطعیت می‌تواند کاملاً مؤثر واقع شود. این روش می‌تواند مبتنی بر نتایج به دست آمده از روش‌هایی مانند خوشه‌بندی باشد. از جمله مزایای این روش می‌توان به سادگی پیاده‌سازی آن اشاره نمود. در این مقاله، عدم قطعیت سطوح تقاضای مصرف الکتریکی بر این اساس شبیه‌سازی خواهد شد [۲۰]. عدم قطعیت در تقاضای بار نیروگاه‌های مجازی بر اساس سناریوهای ارائه شده، در جدول (۲) تشریح شده است. در این مقاله این ساختار احتمالی هم برای بارهای الکتریکی و هم بارهای حرارتی در نظر گرفته شده است.

برای محاسبه هزینه سوخت واحد بویلر از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$f_{boil}(C_{gh,h}) = \frac{860}{LHV} C_{gh,h} \quad (۳۴)$$

بر اساس مطالعات وندرابی [۲۱] و موسسه انرژی بادی اروپا [۲۷] ارزش تشویقی برای واحدهای تولید انرژی فتولتائیک برابر با \$۴۰۰ به ازای هر مگاوات تولید توان خواهد بود. درحالی‌که این مقدار به ازای هر مگاوات از توان تولیدی واحد بادی تزریق شده به شبکه برابر با \$۳۵۰ خواهد بود. هم‌چنین هزینه از دست دادن بار برابر با \$۸ به ازای هر کیلووات خواهد بود [۲۹-۲۸].

در این مقاله دو مطالعه موردی شامل وضعیت بهره‌برداری عادی شبکه و هم‌چنین بهره‌برداری در وضعیت جزیره‌ای خواهد بود.

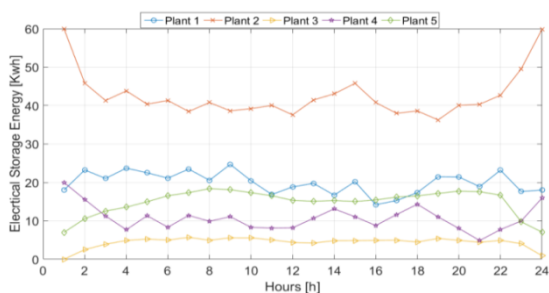
$$f_{chp}(C_{gh,h}, C_{gg,h}) = C_{gh,h} \frac{860}{\eta_{chp,p} LHV} + \min\left(0.25, \frac{860}{\eta_{chp,p} LHV}\right) (C_{gg,h} - C_{gh,h}) \quad (۳۵)$$

که در آن، ارزش حرارتی پایین‌تر (LHV) معادل با ۸۲۵۰ Kcal/m^3 برای گاز طبیعی در نظر گرفته شده است.

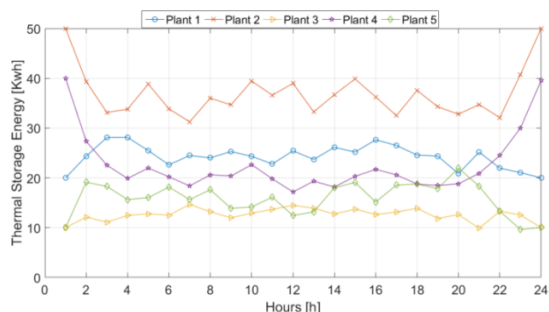
همچنین عدد ۸۶۰ نیز نرخ تبدیل kWh به kcal است. در این نوع از محاسبه هزینه سوخت، میزان یک چهارم از گاز ارسالی برای واحد تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی دارای پرداخت معاف از مالیات خواهد بود. به این معنی که یک چهارم از سوخت ارسالی برای تولید برق و مازاد آن برای تولید حرارت در نظر گرفته خواهد شد. هم‌چنین حالت ساده‌شده توابع در نظر گرفته‌شده

جدول ۳. قیمت توان مصرفی بارهای الکتریکی، حرارتی و توان تولیدی واحدهای تجدیدپذیر

ساعت	قیمت خرید	قیمت فروش	ناحیه ۱				ناحیه ۲				ناحیه ۳				ناحیه ۴				ناحیه ۵			
			El. load	Th. Load	IRES	ERES	El. load	Th. load	IRES	ERES	El. load	Th. load	IRES	ERES	El. load	Th. Load	IRES	ERES	El. load	Th. load	IRES	ERES
۱	۱۰۶	۶۳	۱۵۶	۹۹	۰	۰	۱۲۱	۰	۰	۰	۱۰۷	۳۳	۰	۱۱	۳۲	۶۰	۰	۰	۱۴۰	۰	۰	۶
۲	۱۰۶	۵۳	۱۳۲	۹۹	۰	۰	۸۶	۰	۰	۰	۹۹	۳۳	۰	۷	۶۷	۶۰	۰	۰	۱۳۵	۰	۰	۲
۳	۱۰۶	۵۱	۱۱۰	۹۹	۰	۱	۹۸	۰	۰	۰	۱۱۲	۳۳	۰	۰	۷۸	۵۹	۰	۰	۱۱۲	۰	۰	۴
۴	۱۰۶	۵۰	۱۱۰	۹۹	۰	۰	۷۳	۰	۰	۰	۱۱۰	۳۳	۰	۰	۶۷	۶۰	۰	۰	۸۹	۰	۰	۱
۵	۱۰۶	۵۱	۱۴۰	۹۹	۰	۶	۷۴	۰	۰	۰	۱۴۵	۳۳	۰	۲	۴۴	۶۰	۰	۰	۱۰۱	۰	۰	۰
۶	۱۰۶	۵۲	۱۰۴	۱۰۰	۰	۶	۹۲	۰	۰	۳	۱۴۵	۳۳	۰	۷	۵۴	۶۰	۰	۱	۷۸	۰	۰	۰
۷	۱۰۶	۶۳	۱۶۷	۹۲	۲	۰	۸۴	۲	۲	۰	۸۹	۳۴	۳	۲	۶۸	۵۹	۳	۰	۱۳۱	۲	۲	۰
۸	۱۲۵	۶۷	۱۵۶	۸۴	۵	۲	۱۰۴	۹۸	۵	۶	۱۳۴	۳۵	۵	۴	۱۰۴	۶۰	۵	۱	۱۲۹	۷۹	۵	۰
۹	۱۳۵	۷۳	۱۸۴	۱۰	۲	۲	۱۲۱	۱۱۲	۹	۳	۱۰۵	۵۰	۱۰	۷	۵۷	۶۰	۱۱	۰	۱۴۹	۸۶	۱۱	۱
۱۰	۱۳۵	۸۰	۲۱۹	۱۰	۲	۶	۱۴۶	۱۰۵	۲	۰	۱۲۰	۶۱	۲	۷	۱۲۳	۵۹	۳	۴	۱۲۳	۷۱	۳	۰
۱۱	۱۳۵	۸۰	۲۰۸	۸۸	۷	۴	۱۷۵	۱۱۷	۶	۰	۱۳۲	۶۸	۸	۲	۱۰۹	۵۹	۷	۱	۱۵۲	۹۰	۷	۱
۱۲	۱۳۵	۸۰	۱۰۷	۸۳	۱۱	۱۳	۱۷۸	۱۰۰	۱۱	۰	۱۶۹	۷۰	۱۲	۲	۸۷	۵۹	۱۱	۴	۱۰۶	۷۵	۱۳	۰
۱۳	۱۳۵	۷۰	۱۱۳	۹۲	۱۴	۶	۱۰۵	۸۶	۱۲	۱۰	۱۲۲	۷۰	۱۵	۰	۶۲	۵۹	۱۲	۴	۱۳۷	۱	۱۵	۱
۱۴	۱۳۵	۶۹	۱۵۶	۹۷	۱۱	۹	۱۳۳	۱۱۷	۱۲	۱۶	۱۵۴	۶۵	۱۱	۲۴	۸۴	۶۰	۱۱	۴	۱۲۵	۰	۱۳	۰
۱۵	۱۳۵	۷۳	۱۲۳	۹۷	۷	۱۳	۱۵۰	۱۰۵	۶	۰	۱۰۷	۶۵	۸	۰	۸۸	۶۰	۷	۴	۱۰۸	۲	۷	۰
۱۶	۱۳۵	۷۹	۲۰۷	۹۷	۲	۹	۱۴۸	۱۱۵	۲	۳	۱۴۲	۶۸	۲	۰	۶۳	۶۰	۳	۲۴	۱۲۶	۲۲	۲	۰
۱۷	۱۳۵	۸۰	۲۱۷	۹۷	۲۴	۲	۱۷۲	۱۱۷	۲۴	۳	۱۵۱	۶۷	۲۴	۰	۹۶	۶۰	۲۴	۲۴	۱۳۴	۸۲	۲۴	۳
۱۸	۱۳۵	۷۱	۲۲۲	۹۵	۱۷	۲۴	۱۶۰	۱۱۲	۱۷	۲۴	۱۲۹	۵۸	۱۶	۰	۵۸	۵۹	۱۹	۱۱	۱۰۷	۸۳	۱۷	۰
۱۹	۱۳۵	۶۶	۲۰۴	۹۵	۱۰	۲۴	۱۱۹	۱۱۱	۱۰	۳	۱۳۷	۵۰	۱۱	۰	۶۷	۵۹	۱۰	۴	۱۳۳	۸۳	۱۰	۶
۲۰	۱۲۵	۶۷	۱۹۳	۹۵	۵	۴	۱۱۵	۱۰۲	۵	۱۶	۱۳۲	۴۰	۵	۰	۷۶	۵۹	۵	۴	۱۱۳	۶۸	۵	۶
۲۱	۱۲۵	۷۲	۱۴۱	۹۶	۲	۴	۵۹	۲	۳	۱۶	۹۹	۴۴	۳	۱	۵۸	۵۹	۳	۴	۹۹	۲	۳	۱۳
۲۲	۱۲۵	۷۷	۸۶	۹۵	۰	۶	۴۸	۰	۰	۰	۹۶	۳۳	۰	۰	۵۶	۶۰	۰	۰	۱۳۲	۰	۰	۲۴
۲۳	۱۲۵	۶۷	۱۰۰	۹۴	۰	۲	۵۶	۰	۰	۰	۱۴۹	۳۲	۰	۰	۴۵	۶۰	۰	۰	۱۲۹	۰	۰	۱۷
۲۴	۱۰۶	۶۳	۹۹	۹۳	۰	۱	۵۵	۰	۰	۰	۹۳	۳۲	۰	۰	۵۶	۶۰	۰	۰	۸۷	۰	۰	۱۳



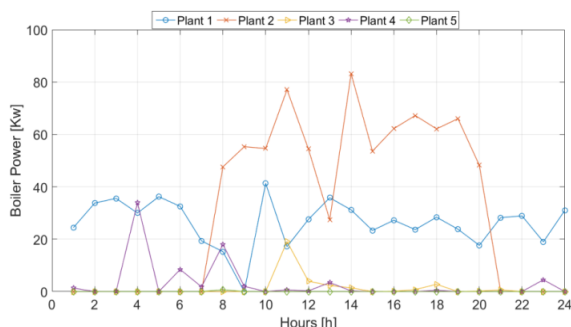
شکل ۴. وضعیت واحدهای ذخیره‌ساز الکتریکی (مطالعه موردی ۱)



شکل ۵. واحدهای ذخیره‌ساز حرارتی (مطالعه موردی ۱)

شکل (۶) روند تولید توان حرارتی توسط بویلر را در طول بازه بهره‌برداری روزانه ارائه می‌کند. قابل مشاهده است متناظر با افزایش بار حرارتی هر یک از نواحی در ساعات ۷ صبح تا ۸ شب، میزان بهره‌برداری از بویلرها در طی این ساعات افزایش می‌یابد. این وضعیت در مورد واحد دوم کاملاً مشهود است. با توجه به این‌که بار حرارتی این ناحیه در ساعات اشاره‌شده به مراتب بالاتر از مجموع ظرفیت حرارتی واحد تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی و همچنین عنصر ذخیره‌ساز حرارتی در این ناحیه است، حضور پرننگ بویلر برای تأمین کمبود توان یک ضرورت است.

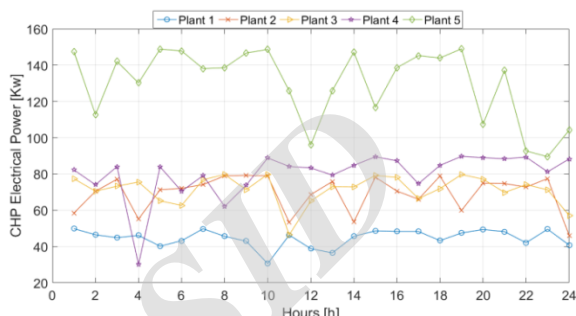
نکته قابل اشاره آن‌که با توجه به عملکرد واحد تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی و ذخیره‌ساز در حدود بیشینه حد ظرفیت در طی این ساعات، الگوی عملکرد بویلر موجود در این ناحیه دقیقاً منطبق با الگوی بار حرارتی است. به عنوان مثال، این وضعیت در ساعت ۱۳ که بار حرارتی ناحیه دوم به مدت یک ساعت دارای کاهش شدید است، کاملاً مشهود است؛ لذا بویلر دوم نیز منطبق بر این افت تقاضا، میزان تولید خود را کاهش می‌دهد.



شکل ۶. توان حرارتی تولیدشده توسط بویلر (مطالعه موردی ۱)

۳-۱. مطالعه موردی ۱: بهره‌برداری عادی شبکه

در این وضعیت، بهره‌برداری آزاد شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد که در آن علاوه بر قیود بهره‌برداری ارائه‌شده در بخش قبل، قیود مربوط به محدودیت‌های خطوط انتقال نیز مورد توجه بوده است. شکل (۳) میزان تولید برنامه‌ریزی‌شده منابع تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی را در بازه ۲۴ ساعته در ۵ ناحیه نشان می‌دهد.



شکل ۳. توان الکتریکی واحدهای CPH (مطالعه موردی ۱)

همان‌گونه که انتظار می‌رود واحد اول برای تأمین بار الکتریکی مورد نیاز در بسیاری از ساعت‌ها در بیشینه میزان تولید خود است. چون بار الکتریکی مورد تقاضا در تمامی ساعت‌ها بیشتر از ظرفیت تولید آن است، لذا میزان تولید خود را در اکثر ساعات در مقادیر نزدیک به بیشینه ظرفیت تولید قرار می‌دهد و مابقی را از منابع ذخیره‌ساز تأمین می‌کند و در صورت کمبود، نیاز خود را از طریق شبکه بالادست برطرف می‌سازد. برای واحد چهارم نیز برای چند ساعت از ساعت ۱۰ صبح تا ۱۶ ظهر همین روال حاکم است و در مقدار نزدیک به بیشینه خود قرار دارد. با این تفاوت که در این ناحیه میزان تقاضای بار حرارتی به صورت یکنواخت بالا است. در نتیجه صرفه بر آن است که به جای استفاده از بویلر، تولید حرارتی از تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی تأمین شود و مازاد انرژی الکتریکی با توجه به قیمت بالاتر خرید به بازار ارائه شود.

شکل‌های (۴-۵) روند تغییرات انرژی ذخیره‌شده در طول روز را نشان می‌دهند. نکته قابل توجه آن‌که چرخه شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی، بر اساس قیمت برق، گاز و همچنین با توجه به الگوهای بار، تولید واحدهای تجدیدپذیر و محدودیت‌های فنی واحدهای تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی موجود در هر ناحیه کاملاً متفاوت است. در نتیجه چندان ساده نیست که تغییرات توان در واحدهای ذخیره‌ساز را مورد بررسی قاطعانه قرار داد. علاوه بر تمامی پارامترهای اشاره‌شده، قید برابری میزان شارژ و دشارژ در طول یک بازه بهره‌برداری از جمله قیودی است که پیش‌بینی رفتار ذخیره‌سازها را پیچیده‌تر نیز می‌کند.

بار پیروی می‌کند؛ درحالی‌که الگوی هزینه‌های جاری به صورت غالب ترکیبی از الگوی تقاضای بارهای الکتریکی و حرارتی مصرفی و همچنین الگوی قیمت خرید انرژی از بازار است. البته باید اذعان نمود که این روابط و ترکیب الگوها به هیچ‌وجه خطی نیست. هر سطح از تقاضای مصرف نشان می‌دهد.

همان‌طور که دیده می‌شود و قبلاً نیز اشاره شده بود، در ساعات میانی ۸ صبح تا ۲۲ بعدازظهر که قیمت فروش برق بالاتر است، هر ناحیه برای تأمین توان خود از واحدهای داخلی خود استفاده می‌کند و توان خریداری‌شده از شبکه کمتر می‌شود؛ لذا هزینه بهره‌برداری به خاطر تولید بیشتر به حداقل خود می‌رسد. در این مطالعه خاص از برنامه‌ریزی و بهره‌برداری نیروگاه مجازی، امید ریاضی برای درآمد حاصله با توجه به جدول (۴) به حدود ۵۳۴- دلار می‌رسد که ۳/۵٪ کاهش را نسبت به حالتی که عدم قطعیت بار وجود ندارد [۱۴]، نشان می‌دهد.

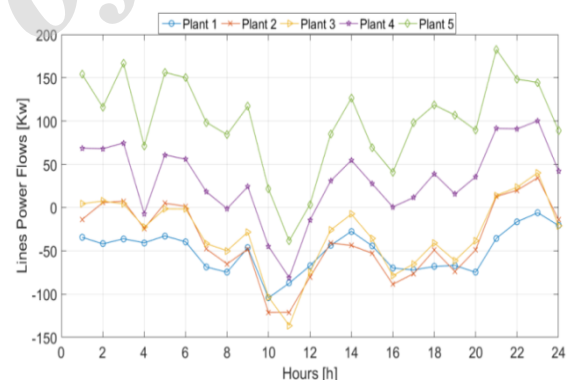
جدول ۲. امید نهایی سود بهره‌برداری در وضعیت بهره‌برداری عادی شبکه (مطالعه موردی ۱)

پارامتر	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵
سود حاصله [S]	-۵۲۰/۸۳	-۵۴۳/۴۶	-۵۶۶/۰۸	-۵۳۱/۸۶	-۵۸۴/۴۶
احتمال سناریو	۰/۶	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۵
امید سود حاصله	-۵۳۴/۷۴				

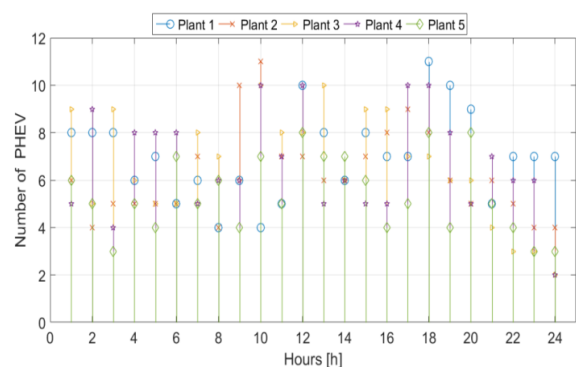
۳-۲. مطالعه موردی ۲: بهره‌برداری جزیره‌ای شبکه پس از حمله هوشمندانه به خطوط بالادست

گسترش روزافزون انواع منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع و ریزشبکه‌ها و همچنین گسترش امکان وقوع حملات خصمانه از پیش تعیین‌شده باعث شده است به عنوان یکی از چالش‌های بزرگ سیستم‌های قدرت مطرح هستند. یکی از این پیشامدها با عنوان پدیده جزیره‌ای شدن^۱ شبکه شناخته می‌شود که در آن بخشی از شبکه مورد بهره‌برداری از شبکه توزیع بالادست جدا می‌گردد و شبکه مورد نظر باید در چنین شرایطی پایداری دینامیکی و استاتیکی خود را حفظ نماید. در این راستا، برنامه‌ریزی تولید و عملکرد نیروگاه‌های مجازی مقیاس وسیع در وضعیت جزیره‌ای یکی از مهم‌ترین مسائل مربوط به بهره‌برداری شبکه‌های توزیع است که در این مطالعه موردی مورد تحقیق واقع شده است. بدین صورت که با در نظر گرفتن مسائل مربوط به کفایت و قابلیت اطمینان سیستم، یک برنامه‌ریزی دقیق برای بهره‌برداری جزیره‌ای سیستم حاضر انجام می‌شود. برای اجرای

توان عبوری از خطوط انتقال واسط میان نواحی و شبکه بالادست در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود به دلیل ظرفیت بالای خطوط، هیچ‌یک به ظرفیت نامی خود نرسیده‌اند. از نکات قابل توجه آن‌که تحلیل توان خط ۵ (متصل به پست شبکه بالادست) نشان می‌دهد برخلاف تمام ساعات روز که شبکه بالادست نقش تغذیه‌کننده دارد، در ساعت ۱۱ صبح به عنوان بار از دیدگاه کل نیروگاه مجازی مقیاس وسیع دیده می‌شود. این تغییر جهت شارش توان در ساعات مختلف روز در خطوط انتقال دیگر نیز دیده می‌شود. تعداد خودروهای برنامه‌ریزی‌شده در بهره‌برداری ۲۴ ساعته روز آینده در شکل (۸) نمایش داده شده است. قابل مشاهده است که تعداد خودروها نیز تا حدی از الگوی بار شبکه پیروی می‌کند به طوری که در زمان‌های پرباری تعداد خودروهای به خدمت گرفته شده افزایش می‌یابد؛ اما در قیاس با واحدهای تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی این پیروی چندان سخت نخواهد بود؛ چرا که زمان ورود واحدهای خودرویی به پارکینگ علی‌رغم پیروی از الگوی بار، در روند هوشمند شارژ خودروها همراه با درصدی عدم قطعیت است.



شکل ۷. توان عبوری خطوط انتقال بین ناحیه‌ها (مطالعه موردی ۱)

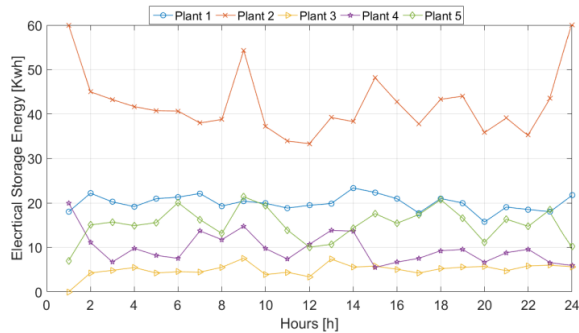


شکل ۸. تعداد خودروهای الکتریکی در بهره‌برداری (مطالعه موردی ۱)

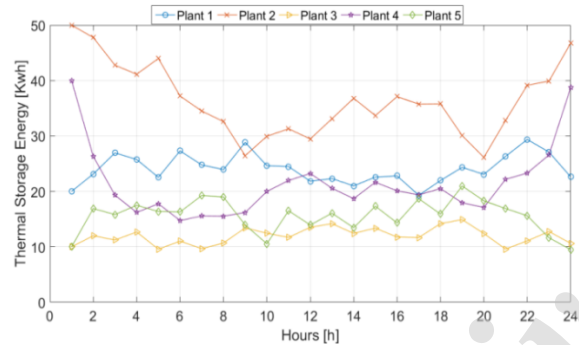
سود کل ناشی از بهره‌برداری از مجموعه نیروگاه‌های مجازی به نوعی از ترکیب الگوی فروش انرژی‌های فراهم‌شده و یارانه‌های تشویقی از منابع انرژی‌های نو خارجی و داخلی به علاوه الگوی

¹ Islanding operation

ذخیره‌ساز الکتریکی و امکان مبادله با نواحی مجاور به صورت کاملاً قطعی نخواهد بود. وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی در وضعیت جزیره‌ای نیروگاه مجازی مقیاس وسیع حاضر، به ترتیب در شکل‌های (۱۱-۱۲) نشان داده شده است.



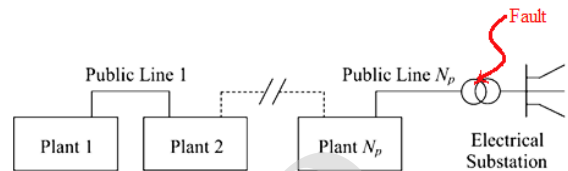
شکل ۱۱. واحدهای ذخیره‌ساز الکتریکی (مطالعه موردی ۲)



شکل ۱۲. وضعیت واحدهای ذخیره‌ساز حرارتی (مطالعه موردی ۲)

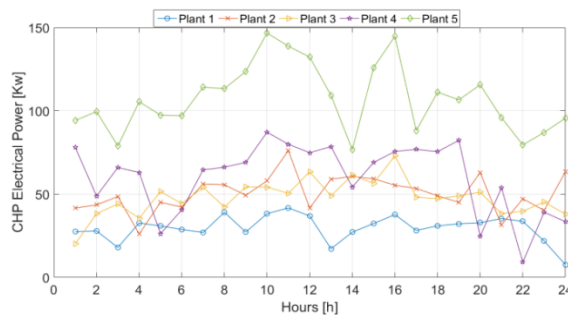
دیده می‌شود که تغییرات نرم و یکنواخت در سطح شارژ و دشارژ عناصر ذخیره‌ساز الکتریکی در وضعیت جزیره‌ای به منظور تأمین قید تعادل توان به تغییراتی با ضربه‌های بیشتر تبدیل شده‌اند. دلیل این امر را می‌توان در این نکته دانست که الگوی شارژ و دشارژ این نوع از ذخیره‌سازها در وضعیت عادی بهره‌برداری بیشتر تحت تأثیر الگوی تغییرات قیمت خرید و فروش انرژی به منظور افزایش سود نیروگاه مجازی بوده است، درحالی‌که در وضعیت جزیره‌ای این اولویت به طور خودکار پس از قیود سخت بهره‌برداری شبکه در جایگاه دوم اهمیت قرار می‌گیرد. البته این میزان از تغییرات فاحش در ذخیره‌سازهای حرارتی کمتر دیده می‌شود؛ چرا که هیچ‌گونه خط انتقالی بین نواحی موجود برای جابه‌جایی توان حرارتی وجود ندارد و در این مطالعه موردی، عمده تغییرات ذخیره‌سازهای حرارتی تنها تحت تأثیر منحنی تغییرات توان حرارتی تولیدشده توسط واحدهای تولید هم‌زمان الکتریکی - حرارتی است. با توجه به این‌که این مطالعه موردی شرایط خاص بهره‌برداری را شبیه‌سازی می‌کند که تنها در روزهای بسیار محدودی از سال مورد استفاده قرار می‌گیرد، قید

این منظور فرض می‌شود که خط انتقال ارتباطی میان آخرین ناحیه با پست شبکه بالادست طی یک رخداد قطع می‌گردد. تشریح این مورد در شکل (۹) نمایش داده شده است. شکل‌های (۱۰) تا (۱۴) نتایج مربوط به وضعیت بهره‌برداری عناصر مختلف موجود در هر یک از واحدهای تولید مجازی را برای مطالعه موردی حاضر نشان می‌دهد.



شکل ۹. خطا در محل اتصال نیروگاه مجازی انتهایی به شبکه بالادست

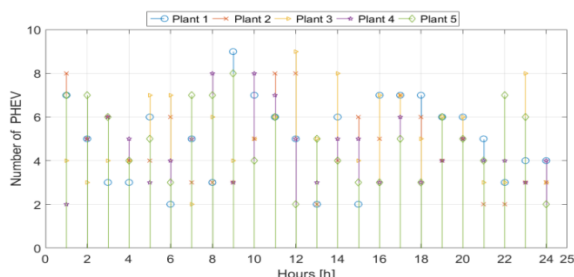
در رابطه با سیستم حاضر در شکل (۱۰) دو نکته حائز اهمیت است. نکته اول آن‌که به دلیل عدم امکان تأمین توان توسط شبکه بالادست، تمامی واحدها ملزم به تأمین توان الکتریکی و تا حد ممکن توان حرارتی مورد نیاز ناحیه خود هستند. در نتیجه سطح توان تولیدی بعضی از واحدها در برخی ساعات به دلیل عدم امکان فروش تمامی توان مازاد تولیدی به شبکه بالادست کاهش یافته (به عنوان مثال واحد پنجم در ساعات ۱ تا ۸ صبح) و در برخی ساعات به دلیل تأمین قید بالانس توان، توان افزایش می‌یابد (به عنوان مثال واحد اول در ساعات ۷ صبح تا ۱۷ عصر).



شکل ۱۰. توان الکتریکی واحد CHP (مطالعه موردی ۲)

مقایسه توان تولیدی واحدهای تولید هم‌زمان الکتریکی - حرارتی برای دو وضعیت بهره‌برداری طبیعی در شکل (۳) و بهره‌برداری جزیره‌ای. اگرچه باید این نکته را به خاطر سپرد که همچنان امکان تبادل توان با واحدهای ناحیه مجاور وجود دارد. نکته دوم آن‌که با مقایسه الگوی بار هر ناحیه و توان تولیدی واحدهای تولید هم‌زمان الکتریکی - حرارتی موجود در همان ناحیه دیده می‌شود که الگوی تولید واحدهای تولید هم‌زمان الکتریکی - حرارتی تا حد زیادی از الگوی بار همان ناحیه پیروی می‌کند. البته قابل اذعان است که این پیروی به دلیل وجود

به‌کارگیری خودروها نسبت به مطالعه موردی قبل کاهش محسوسی داشته است. واضح است که این روند به دلیل کاهش ظرفیت شبکه برای نقل و انتقال با شبکه بالادست است.



شکل ۱۵. تعداد خودروهای الکتریکی بهره‌بردار (مطالعه موردی ۲)

در این حالت از برنامه‌ریزی و بهره‌برداری نیروگاه مجازی، امید ریاضی برای درآمد حاصله با توجه به جدول (۵) به حدود ۷۰۴- دلار می‌رسد که حدود ۳۰٪ کمتر از وضعیت بهره‌برداری غیر جزیره‌ای است. کاملاً مشخص است که در وضعیت بهره‌برداری عادی به دلیل امکان خرید و فروش با شبکه بالادست در ساعاتی که هزینه خرید انرژی پایین است یا فروش انرژی در ساعاتی که قیمت انرژی بالا است، تراکنش با بازار برای اپراتورهای سیستم سود بیشتری را در پی خواهد داشت. همان‌گونه که دیده می‌شود، هزینه‌های بهره‌برداری به دلیل استفاده بیشتر از بویلرها و واحدهای تولید هم‌زمان الکتریکی - حرارتی افزایش پیدا می‌کنند و در مقابل درآمدها به دلیل امکان فروش مازاد توان به شبکه بالادست بیشتر می‌شوند.

در وضعیتی که مجموعه به صورت جزیره بهره‌برداری می‌شود، به دلیل قالب مشابه تمامی نواحی، همه آن‌ها با الگوهای تقریباً مشابه دچار کمبود یا مازاد توان می‌شوند؛ در نتیجه هم در هنگام کمبود و هم در مواقع مازاد توان، تنها تبادل با نواحی مجاور چندان نمی‌تواند پاسخ‌گوی این وضعیت‌ها برای رسیدن به بهینه‌ترین شرایط بهره‌برداری باشد و این وضعیت در نهایت منتج به هزینه بیشتر بهره‌برداری خواهد شد. با مقایسه جدول‌های (۴) و (۵) دیده می‌شود که سود بهره‌برداری با تغییر مطالعه موردی از ۵۳۴/۷۴۵- وضعیت عادی به ۷۰۴/۸۳۲- وضعیت جزیره‌ای کاهش می‌یابد. شکل (۱۶) سود تجمعی را دو مطالعه موردی نشان می‌دهد.

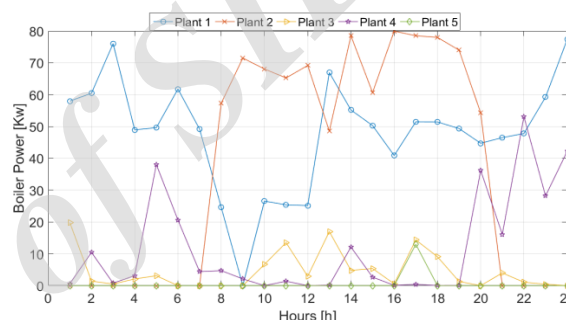
جدول ۳. امید نهایی سود در بهره‌برداری جزیره‌ای (مطالعه

موردی ۲)

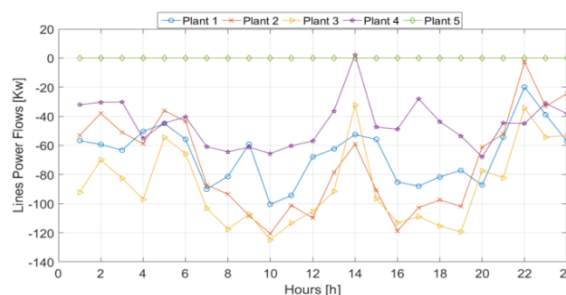
سناریو ۵	سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲	سناریو ۱	پارامتر
-۷۹۹/۵۸	-۶۵۳/۷۰	-۷۱۸/۹۳	-۶۶۶/۸۵	-۷۰۷/۱۷	سود حاصله [\$]
۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۶	احتمال سناریو
-۷۰۴/۸۳۲					امید سود حاصله

تساوی شارژ و دشارژ عناصر ذخیره‌ساز در طی دوره بهره‌برداری با خطا (تلورانس) ۱۰٪ مجاز فرض شده است.

شکل (۱۳) توان تولیدی توسط بویلرها را نشان می‌دهد. قابل‌مشاهده است که الگوی تولید توان بویلرها تا حد زیادی پیرو تغییرات تقاضای توان بارهای حرارتی است. این وضعیت به خوبی در مورد بویلر موجود در ناحیه دوم قابل‌مشاهده است. البته در مورد برخی نواحی (مانند ناحیه پنجم) باید اشاره داشت که به دلیل ظرفیت بالای واحد تولید هم‌زمان الکتریکی - حرارتی در این ناحیه به همراه ذخیره‌ساز حرارتی، بخش اعظم بار حرارتی توسط این دو عنصر تغذیه می‌شود و نکته اشاره‌شده در مورد آن‌ها صادق نخواهد بود. توان عبوری از خطوط انتقال در شکل (۱۴) نمایش داده شده است.



شکل ۱۳. توان حرارتی تولیدشده توسط بویلر (مطالعه موردی ۲)



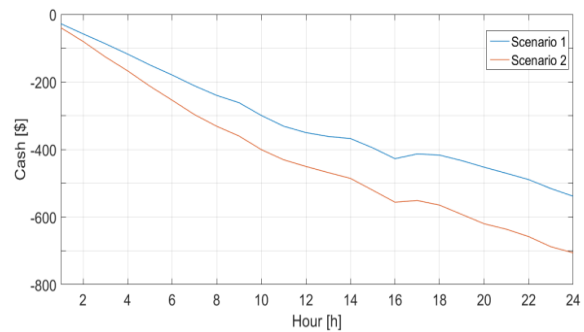
شکل ۱۴. توان عبوری از خطوط انتقال بین ناحیه‌ها (مطالعه موردی ۲)

جریان عبوری از خط منتهی به شبکه بالادست در اثر وقوع یک رخداد صفر است و شبکه را به یک جزیره تبدیل کرده است. در مقایسه با بهره‌برداری عادی شبکه، دیده می‌شود که در این وضعیت دامنه جریان بیشتر خطوط در اکثر ساعت‌ها کاهش یافته است. با توجه به قطع امکان تبادل توان مجموعه نیروگاه‌های مجازی با شبکه بالادست در ساعت‌های پیک بار باهدف تأمین بخشی از تقاضای توان مصرف‌کنندگان و همچنین در ساعت‌های ارزانی قیمت بازار باهدف شارژ باتری‌ها، این کاهش جریان خطوط کاملاً قابل پیش‌بینی بوده است. تعداد خودروهای برنامه‌ریزی‌شده در بهره‌برداری ۲۴ ساعته روز آینده در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود در این مطالعه موردی

قرار گرفته است. عمل بهینه‌سازی توسط یک الگوریتم تکاملی انجام شده و به منظور نزدیک‌سازی روش پیشنهادی به واقعیت‌های سیستم قدرت، عدم قطعیت در بارهای الکتریکی با استفاده از سناریوسازی مبتنی بر توزیع احتمال گسسته و امید ریاضی و هم‌چنین عدم قطعیت رفتار خودروها با شبیه‌سازی مونت کارلو مدل شده است. دو مطالعه موردی در وضعیت بهره‌برداری عادی و بهره‌برداری جزیره‌ای در نظر گرفته شده و وضعیت هر یک از عناصر موجود در نیروگاه‌های مجازی به صورت منحنی‌های عملکرد در دوره زمانی ۲۴ ساعته روز آینده ارائه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. مشاهده شده است که در نظر گرفتن عدم قطعیت بار در مقایسه با حالت پایه موجب کاهش هزینه‌ها شده است، در حالی که عملکرد جزیره‌ای شبکه موجب افزایش هزینه‌های بهره‌برداری سیستم می‌گردد. البته قابل اذعان است که بهره‌برداری جزیره‌ای تنها در موارد خاص و در دوره‌های کوتاه مورد نظر است. باید توجه داشت که برنامه‌ریزی پیشنهادی با امکان بهره‌برداری جزیره‌ای توان مقابله با حملات خرابکارانه و قطع شبکه بالادست را برای مدت ۲۴ ساعت و بدون هیچ مشکلی را داراست. در حقیقت، این وضعیت پدافندی می‌تواند برای حمله به هر یک از نواحی نیروگاه مجازی رخ دهد و روش پیشنهادی امکان مقابله با هر کدام را نیز دارد. به بیان دیگر، بهره‌برداری پیشنهادی تنها با صرف هزینه ناچیزی، روند روتین بهره‌برداری حاضر را تبدیل به بهره‌برداری پدافندی می‌کند. نتایج به خوبی نشان داده‌اند که در شرایط بحرانی نیز متد ارائه شده قادر به تأمین کلیه بارهای حرارتی و الکتریکی را به صورت محلی است. به طور خلاصه، پژوهش حاضر برای اولین بار نیروگاه‌های مجازی در اندازه وسیع را در خدمت اهداف پدافندی قرار داده است، به طوری که برخلاف پژوهش‌های قبلی نه تنها ذخیره‌سازهای الکتریکی، بلکه ذخیره‌سازهای حرارتی و همچنین خودروهای الکتریکی را نیز در فرمول‌بندی خود جای داده است. در حقیقت این مقاله فرمول‌بندی جدیدی از تاب‌آوری شبکه‌های در راستای اهداف پدافندی را با ترکیب چند واحد کوچک نیروگاه مجازی کوچک ارائه داده است.

با توجه به پژوهش‌های گذشته و روش ارائه شده در این مقاله، موارد زیر را می‌توان برای تحقیقات آینده در نظر گرفت.

- پیشنهاد ذخیره‌سازهای جدید مانند پمپ‌های هوا فشرده که دارای قابلیت نگهداری انرژی برای مدت زمان طولانی‌تر و تخلیه با سرعت بالا هستند،
- مدل‌سازی حملات پدافندی با استفاده از نظریه بازی و فرمول‌بندی مجموع صفر برای برنامه‌ریزی نیروگاه‌های مجازی توسط محافظت‌کنندگان شبکه،



شکل ۱۶. جریان‌های نقدی تجمعی سود

باید توجه داشت که هدف از بهره‌برداری جزیره‌ای تنها برای مدت زمان‌های کوتاه و تحت موقعیت‌های ضروری است؛ چرا که برنامه‌ریزی تولید ارائه شده در بهره‌برداری جزیره‌ای باید بتواند حملات عمدی و مجزا شدن از شبکه بالادست را برای مدت ۲۴ ساعت و بدون هرگونه بار از دست رفته کنترل کند. به طور خلاصه، وضعیت جزیره‌ای نمودی از شرایط پدافندی است که می‌تواند پس از یک حمله خرابکارانه در هر یک از نیروگاه مجازی کوچک و یا شبکه بالادست رخ دهد و تکنیک ارائه شده باید توانایی مقابله با آن‌ها را نیز داشته باشد. در این رابطه می‌توان اشاره کرد که این متد پیشنهادی در این مقاله، بهره‌برداری وضعیت عادی شبکه را با پرداخت هزینه کمی به بهره‌برداری پدافندی تبدیل می‌کند تا تحت چنین شرایطی نیز تأمین تمامی مصرف‌کنندگان حرارتی و الکتریکی به صورت محلی صورت پذیرد.

به طور خلاصه می‌توان گفت که پژوهش حاضر تلاشی برای به خدمت گیری نیروگاه‌های مجازی در اندازه وسیع شامل ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی و همچنین خودروهای الکتریکی با دیدگاه پدافندی است تا خط مشی جدیدی از مفهوم تاب‌آوری شبکه‌های هوشمند را با ترکیب چند واحد کوچک نیروگاه مجازی کوچک ارائه دهد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک برنامه‌ریزی بهینه برای یک نیروگاه مجازی مقیاس وسیع شامل چند ناحیه ارائه شده است. نیروگاه‌های مجازی کوچک مشابه فرض شده‌اند و از طریق خطوط ارتباطی انتقال به نیروگاه مجازی مجاور متصل شده‌اند، در حالی که آخرین واحد به پست شبکه توزیع بالادست متصل می‌شود. هر یک از واحدها شامل تعدادی تولیدکننده انرژی نو، ذخیره‌ساز (حرارتی و الکتریکی)، واحدهای تولید هم‌زمان الکتریکی-حرارتی و پارکینگ خودرو بوده‌اند. بیشینه‌سازی سود کل مجموعه نیروگاه‌های مجازی به همراه تأمین تقاضای توان مشترکین در دو دسته الکتریکی و حرارتی، هدف برنامه‌ریزی بهره‌برداری شبکه

- [12] Rostami, M. A.; Raoofat, M. "Optimal Operating Strategy of Virtual Power Plant Considering Plug-in Hybrid Electric Vehicles Load"; *Int. Trans. Elec. Energy Syst.* 2016, 26, 236-252.
- [13] Kahlen, M.; Ketter, W. "Aggregating Electric Cars to Sustainable Virtual Power Plants: The Value of Flexibility in Future Electricity Market"; *AAAI*, 2015, 665-671.
- [14] Giuntoli, M.; Poli, D. "Optimized Thermal and Electrical Scheduling of a Large Scale Virtual Power Plant in the Presence of Energy Storages"; *IEEE Trans. Smart Grid* 2013, 4, 942-955.
- [15] Barsali, S.; Ceraolo, M.; Giglioli, R.; Poli, D. "Aggregation and Management of the Demand in a Deregulated Electricity Market"; *IEEE Power Tech.*, Bologna, Italy, 2003.
- [16] Qian, K.; Zhou, C.; Allan, M.; Yuan, Y. "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems"; *IEEE Trans. Power Systems* 2011, 26, 802-810.
- [17] Li, G.; Zhang, X. P. "Modeling of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Demand in Probabilistic Power Flow Calculations"; *IEEE Trans. Smart Grid* 2012, 3, 492-499.
- [18] Rezaee, S.; Farjah, E.; Khorramdel, B. "Probabilistic Analysis of Plug-in Electric Vehicles Impact on Electrical Grid Through Homes and Parking Lots"; *IEEE Trans. Sustainable Energy* 2013, 4, 1024-1033.
- [19] Dulău, L. I.; Abrudean, M.; Bică, D. "Distributed Generation and Virtual Power Plants"; *Power Engineering Conference (UPEC)*, 49th International Universities, 1-5, 2014.
- [20] Saber, A. Y.; Venayagamoorthy, G. K. "Resource Scheduling under Uncertainty in a Smart Grid with Renewables and Plug-in Vehicles"; *IEEE Systems Journal* 2012, 6, 103-109.
- [21] Vanderbei, R. J. "Linear Programming: Foundations and Extensions"; Springer, 2008.
- [22] Wong, J. Y. "Testing the Nonlinear Integer Programming Solver Here with Generalized Euler Bricks"; 2014.
- [23] Alemany, J. "Symmetry Issues in Mixed Integer Programming based Unit Commitment"; *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2014, 54, 86-90.
- [24] Gil, E.; Aravena, I.; Cárdenas, R. "Generation Capacity Expansion Planning under Hydro Uncertainty using Stochastic Mixed Integer Programming and Scenario Reduction"; *IEEE Trans. Power Systems* 2015, 30, 1838-1847.
- [25] Rajabioun, R. "Cuckoo Optimization Algorithm"; *Appl. Soft Comput.* 2011, 11, 5508-5518.
- [26] Italy 4th Conto Energia (Summary), European Photovoltaic Industry Association, May 2011,
- [27] Italy Annual Report, International Energy Agency Wind, 2011.
- [28] Kariuki, K. K.; Allan, R. N. "Evaluation of Reliability Worth and Value of Lost Load"; *Elect. Eng. Gen. Transm. Distrib* 1996, 14, 171-180.
- [29] Li, W. "Expected Energy Not Served (EENS) Study for Vancouver Island Transmission Reinforcement Project (Part IV: Effects of Existing HVDC on VI Power Supply Reliability)"; Report-BCTC-R009D, 2006.

- برنامه‌ریزی تولید شبکه با استفاده از نظریه چند نمایندگی برای بهره‌برداری گسترده شبکه به‌جای روش کنترل متمرکز توسط بهره‌بردار باهدف مقابله با تهدیدات و حملات خرابکارانه به هر یک از نیروگاه‌های مجازی کوچک،
- مدل‌سازی عدم قطعیت‌های تولید، قیمت بازار و مصرف توسط روش‌های جدید با رعایت همبستگی میان متغیرها مانند روش مدل‌سازی کاپیولا،
- به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه به منظور تولید مجموعه نقاط کار قابل‌دسترس برای بهبود همزمان اهداف اقتصادی در کنار برنامه‌ریزی با اهداف پدافندی،
- به‌کارگیری واحدهای بارهای پاسخگو برای مقابله سریع با وضعیت‌های بحرانی ناشی از تهدیدات خرابکارانه و افزایش مدت زمان تاب‌آوری شبکه پس از وقوع حملات عمدی.

۵. مراجع‌ها

- [1] Ranjbar, M. H.; Mardani, M.; Pirayesh, A. "Presenting a Model for Evaluation of the Physical Protection of Critical Installations for Passive Defense against Physical and Sabotage Threats"; *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2017, 8, 387-398. [In persian]
- [2] Meybodi, M. R.; Amiri, A. H.; Karbasian, M. "Evolutionary Stable Strategies to Defend the Critical and Sensitive Assets within False Attacks and Reliability Approach"; *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2017, 8, 339-348. [In persian]
- [3] Kardakos, E. G.; Simoglou, C. K.; Bakirtzis, A. G. "Optimal Offering Strategy of a Virtual Power Plant: A Stochastic Bilevel Approach"; *IEEE Trans. Smart Grid* 2016, 7, 794-806.
- [4] Lombardi, P.; Stötzer, M.; Styczynski, Z.; Orths, A. "Multi-Criteria Optimization of an Energy Storage System Within a Virtual Power Plant Architecture"; *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, San Diego, CA, USA, 24-29, 2011.
- [5] Ramsay, C.; Aunedi, M. "Characterisation of LSVPPs"; Fenix project, <http://fenix.iwes.fraunhofer.de/html/documents.htm>
- [6] Zdrilic, M.; Pandzicand, H.; Kuzle, I. "The Mixed-Integer Linear Optimization Model of Virtual Power Plant"; 8th Conf. Eur. Energy Market, Zagreb, Croatia, 2011.
- [7] Zamani, A. G.; Zakariazadeh, A.; Jadid, S.; Kazemi, A. "Stochastic Operational Scheduling of Distributed Energy Resources in a Large Scale Virtual Power Plant"; *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2016, 82, 608-620.
- [8] Ruiz, N.; Cobelo, I.; Oyarzabal, J. "A Direct Load Control Model for Virtual Power Plant Management"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2009, 24, 959-966.
- [9] Caldou, R.; Patria, A. R.; Turri, R. "Optimisation Algorithm for a Virtual Power Plant Operation"; 39th UPEC Conf, 2004.
- [10] Wang, M.; Mu, Y.; Jia, H.; Wu, J.; Yu, X.; Qi, Y. "Active Power Regulation for Large-Scale Wind Farms Through an Efficient Power Plant Model of Electric Vehicles"; *Appl. Energy* 2017, 185, 1673-1683.
- [11] Ju, L.; Li, H.; Zhao, J.; Chen, K.; Tan, Q.; Tan, Z. "Multi-Objective Stochastic Scheduling Optimization Model for Connecting a Virtual Power Plant to Wind-Photovoltaic-Electric Vehicles Considering Uncertainties and Demand Response"; *Energy Convers. Manag.* 2016, 128, 160-177.

t_s ذخیره‌ساز حرارتی
 C_{ep} قیمت خرید انرژی
 C_{eres} تعرفه انرژی برای eres
 C_{es} قیمت فروش انرژی
 C_{gg} قیمت سوخت (برای اهداف تولید el)
 C_{gh} قیمت سوخت (برای اهداف تولید حرارت)
 C_{ires} یارانه تولید توان الکتریکی برای ires
 C_{sens} ارزش ازدست‌رفته (SENS)
 $e_{es-final}$ سطح نهایی انرژی در ذخیره‌ساز الکتریکی
 e_{es-max} حداکثر سطح انرژی ذخیره‌ساز الکتریکی
 e_{es-min} حداقل سطح انرژی ذخیره‌ساز الکتریکی
 $e_{es-start}$ سطح اولیه انرژی ذخیره‌ساز الکتریکی
 $e_{es-final}$ سطح نهایی انرژی ذخیره‌ساز الکتریکی
 e_{ts-max} حداکثر سطح انرژی ذخیره‌ساز حرارتی
 e_{ts-min} حداقل سطح انرژی ذخیره‌ساز حرارتی
 m مسافت طی شده روزانه
 $e_{ts-start}$ سطح اولیه انرژی ذخیره‌ساز حرارتی
 $P_{boil-max}$ توان نامی خروجی بویلر
 $P_{echp-min}$ توان نامی الکتریکی CHP
 $P_{el,pt}$ تخمین توان در نیروگاه مجازی p در ساعت t
 $P_{eres-max}$ توان خروجی مورد انتظار eres
 $P_{es-char}$ حداکثر توان شارژ در ذخیره‌ساز الکتریکی
 $P_{es-disc}$ حداکثر توان دشارژ در ذخیره‌ساز الکتریکی
 $e_{ires-max}$ توان مورد انتظار خروجی ires
 $P_{lin-max}$ ظرفیت خط بالادست
 P_{PHEV} توان تولیدی پارکینگ خودرو
 e_{ll} تخمین بار حرارتی برای نیروگاه مجازی
 $P_{ts-char}$ حداکثر توان شارژ در ذخیره‌ساز حرارتی
 $P_{ts-disc}$ حداکثر توان دشارژ در ذخیره‌ساز حرارتی
 δ اندازه قدم‌های زمانی
 η_{boil} راندمان حرارتی بویلر
 η_{chp} راندمان الکتریکی CHP
 η_{es} راندمان شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
 η_{ts} راندمان شارژ ذخیره‌ساز حرارتی
 λ_{chp} نرخ تبدیل برق به گرما برای CHP
 P_{boil} توان خروجی حرارتی بویلر
 P_{echp} توان الکتریکی خروجی CHP
 P_{sens} قطع بار الکتریکی
 P_{eres} توان الکتریکی خروجی eres
 P_{ts} توان خروجی ذخیره‌ساز حرارتی
 P_{sur} پخش مازاد توان حرارتی

فهرست علائم و اختصارات

محدودده تمام الکتریکی خودرو AER
 تولید هم‌زمان برق و گرما CHP
 الگوریتم بهینه‌سازی فاخته COA
 نیروگاه برق سنتی CPP
 نیروگاه مجازی سنتی $CVPP$
 منبع انرژی پراکنده DER
 عمق تخلیه باتری DoD
 تولید پراکنده DG
 ذخیره‌ساز الکتریکی ES
 VPP مقیاس وسیع $LSVPP$
 برنامه‌ریزی عدد صحیح MIP
 نقطه اتصال مشترک PCC
 خودرو الکتریکی ترکیبی قابل اتصال به شبکه $PHEV$
 منابع انرژی تجدیدپذیر RES
 هماهنگ‌کننده زمان‌بندی SC
 انرژی الکتریکی برنامه‌ریزی شده مصرف‌نشده $SENS$
 شبکه هوشمند SG
 سرمایه‌گذاری کوچک-متوسط SME
 ذخیره‌ساز حرارتی TS
 VPP تکنیکی $TVPP$
 وضعیت شارژ خودرو SOC
 نقطه مجازی اتصال مشترک $VPCC$
 نیروگاه مجازی تولید توان VPP
 واحدها $\{1, \dots, N_p\}$
 استپ‌های زمانی $\{T_s, \dots, T_e\}$
 بویلر $boil$
 توان خروجی الکتریکی CHP P_{echp}
 بار الکتریکی el
 RES خارجی $eres$
 خارجی ext
 داخلی int
 RES داخلی $ires$
 خط انتقال توان tin
 اندیس واحد نیروگاه مجازی p ام p
 اندیس نیروگاه مجازی p ام، در زمان t ام pt
 اندیس ساعت h ام h
 اندیس قدم زمانی t
 مازاد حرارتی sur
 اندیس بالانویس مربوط به سناریو S s
 توان حرارتی خروجی CHP P_{chp}
 بار حرارتی tl