

Power system probabilistic scheduling with electric vehicles considering renewable energy sources uncertainties

Iman Goroohi Sardou¹, Mohammad Javad Shahriyari²

¹ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, University of Jiroft, Jiroft, Iran
imangoroohi@gmail.com

² Student, Department of Electrical Engineering, University of Jiroft, Jiroft, Iran
mohammadjavadshahryari@gmail.com

Abstract:

With the increasing development of human science and societies as well as increased air pollution and global temperature, the need for renewable energy and electric vehicles has increased more than ever. Wind farms, as well as solar cells have a special place because of their greater production capacity, more general acceptability and cost-effectiveness. The main challenge in RESs development is uncertainty in their generation due to lack of continuous availability of adequate wind speed and solar radiation during 24 hours of day. In this paper, a mixed integer linear programming (MILP) model is proposed for power system probabilistic scheduling considering electric vehicles and RESs. In the proposed model, autoregressive moving average (ARMA) approach is employed to generate scenarios for wind speed and solar radiation. Besides, a technique based on Kantorovich distance matrix is employed to reduce the generated scenarios. Conditional value at risk (CVaR) method is used for management and analysis of risks due to the system uncertainties. Moreover, the efficiency of electric vehicles batteries to cover the uncertainties of RESs is evaluated. Furthermore, the optimal placement of Vehicle to grid (V2g) stations and RESs (wind and solar farms) are determined. Modified IEEE 24-bus test system including two wind farms, three solar farms and three V2g stations is studied to verify the effectiveness of the proposed model. Results of simulation in Gams software environment demonstrate that the power stored in V2g stations play an effective role in covering the uncertainties of wind and solar farms power generation.

Keywords: Probabilistic scheduling, Electric Vehicle, Scenario, Renewable energy resources, Risk management.

برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور خودروهای برقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر

ایمان گروهی ساردو^۱، محمدجواد شهریاری^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

imangoroohi@ujiroft.ac.ir

۲- کارشناسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

mohammadjavadsahryari@gmail.com

چکیده: با پیشرفت روزافزون علوم و جوامع بشری و نیز افزایش آلاینده‌های هوا و دمای کره زمین، نیاز به انرژی‌های تجدیدپذیر و خودروهای برقی بیش از پیش افزایش یافته است. در این میان بهره‌برداری از مزارع بادی و سلول‌های خورشیدی، به دلیل توانایی تولید بیشتر، مقبولیت عام‌تر و مقرون به صرفه‌تر بودنشان از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. تنها چالش موجود پیش روی استفاده از انرژی‌های نو، عدم قطعیت در تولیدشان به دلیل نبود تابش خورشید و وزش باد به‌طور پیوسته در ساعات مختلف از شبانه‌روز است. در این مقاله، مسئله برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور خودروهای برقی (V2g^۱) و منابع انرژی تجدیدپذیر با استفاده از یک مدل خطی ترکیبی عدد صحیح (MILP^۲) حل شده است. در مدل پیشنهادی با استفاده از روش خودهمبسته میانگین متحرک (ARMA^۳)، سناریوهای مختلف برای سرعت باد و ضریب تابش خورشید ایجاد شده است. همچنین، از روش ماتریس فاصله کانتروویج^۴ برای کاهش سناریوهای تولیدشده استفاده می‌شود. در مدل پیشنهادی روش ارزش در معرض خطر مشروط (CVaR^۵) برای ارزیابی و مدیریت ریسک ناشی از عدم قطعیت‌های مسئله پیشنهادی استفاده شده است. علاوه بر این، استفاده از ظرفیت توان ذخیره‌شده در باتری خودروهای برقی در پوشش عدم قطعیت تولید منابع انرژی بادی و خورشیدی ارزیابی شده است. همچنین، در مدل پیشنهادی تمامی منابع انرژی تجدیدپذیر و ایستگاه‌های V2g در شبکه جایابی شده‌اند. شبکه اصلاح‌شده ۲۴ باسه IEEE شامل دو مزرعه بادی، سه مزرعه خورشیدی و سه ایستگاه V2g به‌عنوان شبکه نمونه بررسی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار گمز^۶ نشان می‌دهند ظرفیت توان ذخیره‌شده در ایستگاه‌های V2g در پوشش عدم قطعیت مزارع بادی و خورشیدی نقش بسزایی را ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی احتمالی، خودروی برقی، سناریو، منابع انرژی تجدیدپذیر، مدیریت ریسک

۱- مقدمه

مصرف برق، تولید بیشتر نیروی برق در دستور کار هر کشوری قرار دارد. در این بین، علاوه بر واحدهای نیروگاهی، استفاده از نیروگاه‌های تجدیدپذیر اهمیت بسزایی دارد. برای درک بیشتر این اهمیت، دلایل زیر را می‌توان برشمرد: ۱- رایگان بودن، ۲- منابع بی‌انتهای دارند، ۳- آلاینده‌گی زیست محیطی ندارند، ۴- کاهش مصرف در زمان پیک، ۵- با استفاده کردن از این منابع می‌توان با جامعه جهانی پیشروی کرد. همان‌طور که گفته شد، ازجمله پیشرفت‌های اخیر، تکنولوژی خودروهای برقی بوده است

همان‌طور که می‌دانید، با افزایش مراکز صنعتی و مکانیزه شدن بیشتر ابزارآلات موجود و به تبع آن، افزایش

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۵

نام نویسنده مسئول: ایمان گروهی ساردو

نشانی نویسنده مسئول: ایران - جیرفت - دانشگاه جیرفت - گروه مهندسی برق

برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور خودروهای برقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع ...

می‌شویم که مراجع [۱۵-۱۱] این موضوع را در نظر گرفته و با برنامه‌ریزی دقیق روی شارژ و دشارژ ایستگاه‌های خودروهای برقی سعی در حل آن داشته‌اند. همچنین، ایجاد یک مدل کلی برای شارژ و دشارژ ایستگاه‌ها به‌علت رفتار تصادفی خودروها در دستور کار مراجع [۱۶] و [۱۷] قرار گرفته است. در مرجع [۱۸] یک هدف دوسطحی برای پیشینه کردن سود مالک نیروگاه بادی مشارکت‌کننده در بازار انرژی روز پیش رو و نیز کمینه کردن هزینه‌های پرداختی توسط تجمیع‌کننده خودروهای برقی ارائه شده است که در آن، روش CVaR برای مدیریت ریسک ناشی از قیمت‌های بازار و تقاضای مصرفی تجمیع‌کننده‌های خودروهای برقی استفاده شده است. مسئله دیگر در بحث خودروهای برقی تعیین کردن سطح مخصوصی از شارژ باتری‌های آنها است که از یک حدی بالاتر و از یک حد پایین‌تر نباید تا در این صورت ایمنی باتری خودروها تأمین شود. در مرجع [۱۹] این مسئله مدنظر قرار گرفته شده است، اگر در بحث خودروهای برقی توجه به سمت بالابردن ضریب امنیت شبکه جلب شود، همانند مرجع [۲۰] از قیود امنیتی SCUC می‌توان استفاده کرد که در این صورت، تابع هدف موجود مسئله از حالت کمینه به بیشینه تغییر حالت می‌دهد. شرایط پیک بار در پردازش شارژ و دشارژ ایستگاه‌ها تأثیر بسزایی دارد که مرجع [۲۱] این موضوع را بررسی و درنهایت با انجام بهینه‌سازی مربوطه مسئله را حل کرده است. مرجع [۲۲]، تجمیع‌کننده‌های خودروی برقی را به‌صورت بارهای کنترل‌پذیر و منابع ذخیره انرژی دارای رفتار تصادفی، مدل کرده است. در این مرجع، تجمیع‌کننده‌های خودروی برقی برای تأمین بار لحظه‌ای یا به‌صورت رزرو چرخان استفاده می‌شوند. مرجع [۲۲] با استفاده از عملکرد هماهنگ ایستگاههای V2g و کنترل‌کننده‌های فرکانسی سعی در تقویت کنترل بار - فرکانس سیستم قدرت دارد. از روش بهینه‌سازی تجمعی ذرات (PSO)^۱ برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترلر PI^۲ و کنترل تغییر حالت شارژ (SOC)^۳ باتری خودروها استفاده می‌شود. عیب اصلی روش‌های فراابتکاری مانند روش PSO این است که هیچ تضمینی در دست‌یافتن به جواب بهینه نهایی وجود ندارد و معمولاً این روش‌ها در بهینه‌های محلی گرفتار می‌شوند. در مراجع [۲۴]

که در صنعت تحول عظیمی ایجاد کرد؛ برای مثال، کاهش سطح آلاینده‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی و کمک به شبکه قدرت برای جبران عدم قطعیت ناشی از تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر را می‌توان نام برد. همچنین، چون V2g انرژی را درون خود ذخیره می‌کند، در زمینه ذخیره تأمین‌شده با واحدهای نیروگاهی و تجدیدپذیر اهمیت بسزایی دارند.

در مراجع [۳-۱]، نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر، از جمله منابع انرژی باد و خورشید در سیستم قدرت و تأثیر چشمگیر آنها بر عدم قطعیت در بهره‌برداری، پایداری و قابلیت اطمینان بررسی شده است که این عدم قطعیت، همانند مرجع [۴]، با تولید سناریوهایی با استفاده از روش مونت‌کارلو تا حدودی حل می‌شود؛ البته این روش با وجود سادگی در ایجاد همبستگی قوی بین متغیرها تا حدودی ناتوان است. یکی دیگر از روش‌های تولید سناریو، استفاده از منحنی توزیع نرمال و به دست آوردن تابع چگالی احتمال هرکدام است که در مرجع [۵] به آن اشاره شده است. از جمله مؤلفه‌های سناریوهای تولیدی سرعت باد است که تأثیر آن بر قدرت خروجی توربین‌های بادی در مرجع [۶] به‌صورت مستقیم در نظر گرفته شده است. طبق مرجع [۷] ثابت می‌شود سناریوهای تولیدی در یک بازه کوتاه تأثیر بسزایی بر هزینه‌های بهره‌برداری دارند که به‌طور بنیادی بهترین جواب برای چنین مسئله‌ای در مرجع [۸] با آزمایش تمامی ترکیبات ممکن به دست می‌آید. مرجع [۹] روش ذخیره توان خروجی منابع تجدیدپذیر در باتری‌ها را برای بهبود عدم قطعیت پیشنهاد داده است. به این صورت که در مواقع تولید توان، باتری‌ها در وضعیت شارژ قرار می‌گیرند و در هنگام عدم تولید توان، همان باتری‌ها ذخیره انرژی خود را دشارژ می‌کنند. مرجع [۱۰]، پیشینه‌کردن سود تجمیع‌کننده پاسخگوی تقاضا را با در نظر گرفتن قیود امنیتی ولتاژ و فرکانس مدنظر قرار داده است.

در بخش ترکیب مسائل مربوط به عدم قطعیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر و خودروهای برقی با چالش‌های جدیدی اعم از تأثیر سناریوهای تولیدی بر وضعیت خودروهای برقی و همچنین، جایابی هم‌زمان منابع انرژی تجدیدپذیر و ایستگاه‌های خودروهای برقی روبه‌رو

روش ARMA سناریوهای مختلفی برای پارامترهای دارای عدم قطعیت سیستم، یعنی سرعت باد و میزان تابش خورشید تولید می‌شود. همچنین، به منظور جلوگیری از افزایش بی‌اندازه حجم محاسباتی مسئله از روش ماتریس فاصله کانترویچ برای کاهش سناریوهای تولیدی استفاده می‌شود. برای مدیریت ریسک ناشی از عدم قطعیت‌های مسئله پیشنهادی برنامه‌ریزی سیستم از روش ارزش CVaR استفاده شده است. در مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی سیستم سعی شده است بین متغیرات مسئله، هماهنگی کلی ایجاد شود؛ به طوری که هم‌زمان علاوه بر جابجایی مزارع بادی، مزارع خورشیدی و ایستگاه‌های خودروی برقی، ظرفیت تولید آنها را نیز طبق سناریوهای ایجاد شده بتوان تعیین کرد و در نهایت، با هدف کمینه کردن هزینه‌های برنامه‌ریزی سیستم، مسئله را حل کرد. همچنین، بین توان خروجی نیروگاه‌های تجدیدپذیر و توان شارژ و دشارژ ایستگاه‌های خودروی برقی یک ارتباط قوی ایجاد شده است. به این صورت که با کاهش توان خروجی نیروگاه‌های تجدیدپذیر، ایستگاه‌ها کسری توان مورد نیاز شبکه را با ظرفیت دشارژشان تأمین می‌کنند و همچنین، با افزایش توان خروجی نیروگاه‌های تجدیدپذیر، ایستگاه‌ها از آن برای شارژ خودروها استفاده می‌کنند و توان دشارژ را به حداقل مقدار می‌رسانند. جدول (۱) تفاوت‌های مقاله حاضر نسبت به مطالعات اخیر مرتبط را نشان می‌دهد. نوآوری‌های مقاله حاضر در مقایسه با سایر پژوهش‌های مرتبط به صورت زیر هستند:

- ارائه مدلی جامع مبتنی بر مدل MILP برای برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور هم‌زمان ایستگاه‌های بزرگ مقیاس V2g و منابع انرژی تجدیدپذیر شامل مزارع بادی و خورشیدی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت این منابع و همچنین، مدیریت و تحلیل ریسک ناشی از این عدم قطعیت‌ها (جامع بودن مدل پیشنهادی در جدول (۱) مشاهده می‌شود)؛

- استفاده از تبدیل داده‌ها به منظور نرمالیزه کردن سناریوهای تولید شده از سرعت وزش باد و ضریب تابش خورشید (به این علت که داده‌ها لزوماً دارای توزیع احتمالاتی نرمال نیستند)؛

و [۲۵]، مدیریت ظرفیت توان ذخیره‌شده در باتری خودروهای برقی برای بهینه‌سازی توزیع توان‌های اکتیو و راکتیو در شبکه توزیع بررسی می‌شود. مرجع [۲۴] نشان می‌دهد ذخیره انرژی و تولید توان راکتیو فراهم شده با خودروهای برقی در پایداری ولتاژ بسیار مؤثر است و در نتیجه، نیاز به تقویت شبکه برق را کاهش می‌دهد. مرجع [۲۵] عدم قطعیت‌های مختلف مربوط به بار ساعتی و نرخ شارژ باتری‌های خودروهای برقی را مدل کرده است. در تمامی مراجع [۲۲-۲۵] از روش بهینه‌سازی مقاوم^۱ برای حل مسائل بهینه‌سازی دارای عدم قطعیت استفاده می‌شود. از جمله مشکلات روش بهینه‌سازی مقاوم در مقابل روش‌های برنامه‌ریزی احتمالی استفاده شده در مقاله حاضر این است که اگرچه روش بهینه‌سازی مقاوم مسئله را ساده‌تر می‌کند و پیچیدگی‌های مدل ریاضی مسئله را کاهش می‌دهد، به دلیل ماهیت محافظه‌کارانه آن و اینکه بهینه‌سازی را بر اساس شناسایی بدترین حالت متغیرهای دارای عدم قطعیت (که ممکن است احتمال وقوع پایینی داشته باشد) انجام می‌دهد، در نهایت به هزینه برنامه‌ریزی بزرگ‌تری (در مسائل مربوط به برنامه‌ریزی سیستم قدرت) ختم می‌شود؛ در نتیجه، از سطح بهینگی جواب نهایی مسئله کاسته می‌شود. با توجه به مراجع بالا، بیشتر پژوهش‌های اخیر بر بررسی اثرات حضور خودروهای برقی در سطح شبکه توزیع و در حضور واحدهای تولید پراکنده کوچک مقیاس متمرکز شده است یا تحلیل ریسک و درآمد مالکان خودروهای برقی بررسی شده‌اند. بنابراین، انجام پژوهش‌های زیر ضروری به نظر می‌رسد؛ مطالعه اثرات حضور هم‌زمان ایستگاه‌های بزرگ مقیاس V2g و مزارع بادی و خورشیدی در سیستم قدرت بر برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم و بررسی اثرات ظرفیت انرژی ذخیره شده در باتری این خودروها (که در مجموع درخور ملاحظه است) بر پوشش عدم قطعیت تولید منابع انرژی تجدیدپذیر که نفوذ آنها در شبکه در حال گسترش است. در مقاله حاضر یک مدل یکپارچه برنامه‌ریزی خطی ترکیبی عدد صحیح (MILP) برای برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور ایستگاه‌های V2g و مزارع بادی و خورشیدی ارائه شده است. در مدل پیشنهادی با استفاده از

برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور خودروهای برقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع ...

• بررسی اثرات ظرفیت انرژی ذخیره شده در باتری و خورشیدی با مقایسه نتایج حاصل از موارد مطالعه خودروهای برقی بر پوشش عدم قطعیت تولید منابع انرژی مختلف.

ردیف	سال	مدل‌سازی عدم قطعیت	عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر	روش کاهش سناریو	تحلیل ریسک	مدل‌سازی شارژ و دشارژ خودروهای برقی	جایابی ایستگاه‌های V2g	جایابی منابع انرژی تجدیدپذیر	بهره‌گیری از مدل‌های کلاسیک به جای مدل‌های فراابتکاری	بررسی اثرات حضور همزمان منابع بادی، خورشیدی و ایستگاه‌های V2g در سطح فوق توزیع	استفاده از تبدیل داده‌ها به منظور نرمالیزه کردن سناریوها
[۳]	۱۳۹۸	احتمالی	✓	ارائه نشده	-	-	-	-	-	-	-
[۱۰]	۲۰۱۹	تصادفی	✓	ارائه نشده	✓	-	-	-	✓	-	-
[۱۴]	۱۳۹۶	تصادفی	-	ارائه نشده	-	✓	-	-	-	-	-
[۱۵]	۱۳۹۲	تصادفی	-	ارائه نشده	-	✓	✓	✓	-	✓	-
[۱۶]	۱۳۹۷	تصادفی	-	الگوریتم کاهش	-	✓	-	-	✓	-	-
[۱۷]	۲۰۱۸	تصادفی	-	ارائه نشده	-	✓	-	-	-	-	-
[۱۸]	2019	تصادفی	✓	الگوریتم کاهش	✓	-	-	-	✓	-	-
[۲۱]	۲۰۱۸	تصادفی	-	ارائه نشده	-	✓	-	-	-	-	-
[۲۲]	2015	مقاوم	-	ارائه نشده	-	✓	-	-	✓	-	-
[۲۳]	2014	مقاوم	✓	ارائه نشده	-	✓	-	-	-	✓	-
[۲۴]	2018	مقاوم	-	ارائه نشده	-	✓	-	-	✓	-	-
[۲۵]	2018	مقاوم	✓	ارائه نشده	-	✓	-	-	✓	-	-
مقاله حاضر	-	احتمالی	✓	ماتریس فاصله کانترویج	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

جدول (۱): مقایسه مقاله حاضر نسبت به مطالعات اخیر مرتبط

۲- توصیف مسئله

در این مقاله، حل مسئله برنامه ریزی احتمالی سیستم قدرت شامل تعیین جایابی بهینه ایستگاه‌های V2g و واحدهای بادی و خورشیدی و همچنین، تعیین تولید بهینه واحدهای نیروگاهی، واحدهای بادی و خورشیدی و تعیین میزان شارژ و دشارژ ایستگاه‌های V2g در یک بازه زمانی چند ساعته بررسی می‌شود. چارچوب مسئله بهینه سازی پیشنهادی شامل مدل سازی احتمالاتی، روش تولید و کاهش

سناریو، روش پیشنهادی ارزیابی و مدیریت ریسک، تابع هدف و قیود بررسی شده در این بخش ارائه می‌شود.

۲-۱- مدل سازی احتمالاتی

در علم ریاضیات، مبحث توزیع آمار و احتمال از اهمیت زیادی برخوردار است. در این بین، بخش توزیع احتمال - نرمال و همچنین، تابع چگالی احتمال به دلیل سادگی روند کار و ایجاد یک وابستگی بین متغیرات

است. مدل آرما شامل دو بخش اتورگرسیو (AR) و میانگین حرکتی (MA) است؛ بنابراین، در فرم ریاضی این مدل را به صورت $ARMA^{p,q}$ نمایش می‌دهند که در آن p مرتبه مدل AR و q مرتبه مدل MA است [۲۷]. به فرم ریاضی مدل آرما در رابطه (۲) اشاره شده است.

$$G^t = \zeta^t + \sum_p \varphi^p G^{t-p} + \sum_q \gamma^q \zeta^{t-q} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، ζ^t نشان‌دهنده وایت نویز یا خطای تخمین است و انحراف معیار STD با میانگین صفر دارد. در ارزیابی مدل آرما، ضرایب φ^p و γ^q قبل از جایگذاری در رابطه (۲) محاسبه می‌شوند تا براساس مقادیر گذشته مؤلفه های سناریوها یعنی سرعت باد و ضریب تابش خورشید، سناریوهای جدید برای آینده تولید شوند. شایان توجه است که روش ARMA در مقایسه با روش مونت کارلو از توانایی بیشتری برای ایجاد وابستگی بین متغیرها برخوردار است.

۳-۲- کاهش سناریوها با استفاده از روش

ماتریس فاصله کانترویچ

دقت محاسبات و طولانی شدن فرایند محاسبات مسائلی که بر پایه سناریوها هستند، به تعداد سناریوها بستگی دارد؛ بنابراین، لازم است سناریوهای تولیدشده که شمار آنها زیاد است را با روش های کاهش سناریو کاهش داد که یکی از آنها روش ماتریس فاصله کانترویچ است. اقدام اولیه برای کاهش سناریوها، حذف سناریوهای نزدیک به هم و سناریوهای با احتمال وقوع کم است. به این منظور از الگوریتم های کاهش سناریو استفاده می‌شود. این الگوریتم ها یک زیر مجموعه از سناریوهای تولیدشده را مشخص و احتمالات آنها را محاسبه می‌کنند؛ به گونه ای که احتمال سناریوی حذف شده به نزدیک ترین سناریوی موجود از نظر فاصله احتمالاتی اضافه شود. فاصله کانترویچ در واقع فاصله احتمالاتی بین دو مجموعه سناریوی تولیدشده است؛ هرچه این فاصله میان دو سناریو کمتر باشد، یعنی دو فرایند احتمالی مشابه در دسترس است. در این روش، احتمال تمامی سناریوهای حذف شده برابر با صفر در نظر گرفته می‌شوند و احتمال سناریوهای باقیمانده برابر با مجموع

موجود، بیشتر استفاده می‌شوند. توزیع احتمالی نرمال، میانگین^{۱۱} و انحراف معیار^{۱۲} مشخص دارد. در واقع، میانگین همان عدد خاص و ثابتی است که تمام مقادیر به دست آمده حول آن، هماهنگی کلی دارند؛ به عبارت دیگر، مقادیر به دست آمده حول آن مقدار ثابت (میانگین)، پراکنده شده‌اند. انحراف معیار نیز در توزیع احتمالی نرمال نشان دهنده پراکندگی اعداد است و با اطلاع از انحراف معیار می‌توان داده ها را در اطراف میانگین دسته بندی کرد. فرم ریاضی توزیع احتمالی نرمال در رابطه (۱) مشاهده می‌شود:

$$f^x = \frac{1}{STD \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-Mean)^2}{2STD^2}} \quad (1)$$

روند تولید سناریو و همچنین، اثر دادن احتمال آنها روی توان خروجی واحدها به ترتیب به توزیع احتمالی نرمال و تابع چگالی احتمال نیازمند است. در این مقاله با استفاده از میانگین و انحراف معیارهای مشخص، تعدادی سناریو با مؤلفه های سرعت باد و ضریب تابش خورشید با توزیع احتمالی نرمال تولید شده‌اند و در نهایت، محتمل ترین آنها انتخاب شده است. سپس احتمال وقوع هر سناریو با استفاده از تابع چگالی احتمال به دست می‌آید و در تابع هدف اثر داده می‌شود. روند تولید سناریوها و کاهش سناریوها برحسب محتمل ترین آنها در ادامه بحث می‌شود.

در مقاله حاضر، توربین های استفاده شده در مزارع بادی از نوع کوچک فرض شده اند، پس رابطه مؤلفه سرعت باد در هر سناریو با توان خروجی توربین مستقیم و خطی است و به خطی سازی نیاز ندارد [۲۶]؛ اما برای توربین های با ابعاد بزرگ در سرعت وزش باد کم و نیز سرعت وزش باد زیاد، توان خروجی توربین از حالت خطی، خارج و باعث تغییر در توزیع داده ها می‌شود.

۲-۲- تولید سناریوها به روش خودهمبسته

میانگین متحرک (ARMA)

در علم آمار مدل خودهمبسته میانگین متحرک، مدلی است که بیشتر اوقات از آن برای ارزیابی داده های سری زمانی استفاده می‌شود. برای داده های سری زمانی G^t ، مدل آرما ابزاری برای بررسی و حتی پیش بینی مقادیر آینده آن

برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور خودروهای برقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع ...

حاصله کمتر از VaR نخواهد بود. به فرم ریاضی روش محاسبه ریسک CVaR در رابطه (۵) اشاره شده است [۲۸].

$$\omega^t + \frac{1}{1 - \varepsilon^t} \sum_s \text{Pr}_{tot}^s \phi^{t,s} \quad (5)$$

با در نظر گرفتن اینکه:

$$\omega^t \leq \text{PRF}^{t,s} + \phi^{t,s} \quad \forall t, s \quad (6)$$

$$\phi^{t,s} \geq 0 \quad \forall t, s \quad (7)$$

اگر سود (PRF^{t,s}) در سناریو s و زمان t از شاخص VaR در زمان t بیشتر باشد، بدان معناست که (φ) برابر با صفر است. در غیر این صورت (φ) از تفاضل شاخص VaR و سود حاصله به دست می‌آید.

با توجه به توضیحات داده‌شده می‌توان نتیجه گرفت تابع هدف مسئله با در نظر گرفتن ارزیابی ریسک به دو بخش کلی تقسیم می‌شود که یکی از این بخش‌ها به هزینه‌های برنامه‌ریزی شبکه و بخش دیگر به محاسبه و ارزیابی ریسک ناشی از عدم قطعیت‌های مسئله مربوط است. در ادامه و در بخش مربوط به تابع هدف، به توضیحات گفته‌شده در قالب ریاضی اشاره شده است.

۲-۵- تابع هدف

همان‌طور که در رابطه (۸) نمایش داده شده است، مقدار مورد انتظار هزینه برنامه‌ریزی کل سیستم به همراه محاسبه ریسک مالی ناشی از عدم قطعیت سرعت باد و ضریب تابش خورشید، تابع هدف مسئله پیشنهادی در نظر گرفته شده است. به این معنا که تابع هدف شامل دو بخش کلی است. در بخش نخست، یعنی مقدار مورد انتظار هزینه برنامه‌ریزی شبکه، جمله اول مربوط به هزینه‌های واحدهای نیروگاهی، جمله دوم مربوط به هزینه‌های مزرعه بادی، جمله سوم مربوط به هزینه‌های مزرعه خورشیدی و جمله‌های چهارم و پنجم به ترتیب مربوط به هزینه‌های دشارژ و شارژ ایستگاههای V2g است. همان‌طور که در رابطه (۸) مشاهده می‌شود، از مدل پیشنهادی قیمت تک‌بلوکی در فضای تجدید ساختار یافته برای هزینه تولید

احتمالات قبلی و نیز احتمال نزدیک‌ترین سناریوی حذف شده است [۲۷]. در رابطه‌های (۳) و (۴) به ترتیب به فرم ریاضی فاصله کانتروویچ و نیز فاصله برداری بین دو سناریو اشاره شده است.

$$KD^{s,s'} = \text{Pr}_{tot}^s d^{s,s'} \quad (3)$$

$$d^{s,s'} = \sqrt{\sum (s - s')^2} \quad (4)$$

در رابطه (۳) احتمال وقوع هر سناریو (Pr^s) از ضرب احتمالات مؤلفه‌های سناریوها (سرعت وزش باد و ضریب تابش خورشید) به دست می‌آید که در ادامه به آن اشاره شده است.

۴-۲- محاسبه ریسک ناشی از عدم قطعیت

تولید منابع انرژی تجدیدپذیر

محاسبه ریسک مالی در مسائل بهینه‌سازی همراه با عدم قطعیت از اهمیت بسزایی برخوردار است. در واقع، ریسک مالی با کاهش سود حاصله یا مقدار ضرر در اثر وقوع سناریوهای مختلف، برابر است. روش‌های ارزش در معرض ریسک (VaR) و نیز روش ارزش در معرض ریسک مشروط (CVaR)، از جمله روش‌های محاسبه ریسک در مسائل بهینه‌سازی‌اند. در مسائل بهینه‌سازی اقتصادی باید توجه کرد سرعت باد و ضریب تابش خورشید حتماً دارای توزیع احتمالاتی نرمال نیست؛ بنابراین، از روش ارزش در معرض ریسک (VaR) نمی‌توان بهره جست. این موضوع باعث شد پژوهشگران از روش ارزش در معرض ریسک مشروط (CVaR) برای محاسبه ریسک استفاده کنند. در این مقاله فرض شده است سرعت باد و ضریب تابش خورشید در بازه‌های مختلف زمانی، توزیع احتمالاتی غیرنرمال دارند؛ بنابراین، از روش CVaR برای محاسبه ریسک ناشی از عدم قطعیت آنها استفاده شده است. از عناصر مهم در دو روش محاسبه ریسک می‌توان به سطح اطمینان (ε) اشاره کرد. معمولاً بازه تغییرات سطح اطمینان بین ۰/۹ تا ۰/۹۹ است. اگر سطح اطمینان برابر با ۰/۹ در نظر گرفته شود، در روش CVaR به این معنی است که ۱۰٪ بدترین حالت، سود

می‌شود. بازه زمانی دوم به ساعات غیر از ساعات اولیه تعلق دارد که در آن، بحث حالت اولیه ژنراتورها مطرح نمی‌شود.

$$Cst^{s,g,t} = \rho_{st}^g (\sigma^{s,g,t} - Ins^g) \quad \forall t = t1 \quad (10)$$

$$Cst^{s,g,t} = \rho_{st}^g (\sigma^{s,g,t} - \sigma^{s,g,t-1}) \quad \forall t > t1 \quad (11)$$

در رابطه‌های (۱۰) و (۱۱)، نشان دهنده هزینه ثابت راه‌اندازی واحدها است.

هزینه خاموش کردن واحدهای نیروگاهی: هزینه‌های

خاموش کردن واحدهای نیروگاهی اشاره شده در رابطه‌های (۱۲) و (۱۳)، دو بازه زمانی را شامل می‌شوند. بازه زمانی نخست مربوط به ساعات اولیه است که در آن، حالت اولیه ژنراتورها به صورت یک پارامتر ثابت ورودی مسئله (Ins^g) در نظر گرفته می‌شود. حالت فعلی با حالت اولیه مقایسه می‌شود، اگر تغییر حالت از روشن بودن به خاموش بودن واحد صورت گرفته باشد، مشمول هزینه می‌شود. بازه زمانی دوم به ساعات غیر از ساعات اولیه تعلق دارد که در آن، بحث حالت اولیه ژنراتورها مطرح نمی‌شود.

$$Csh^{s,g,t} = \rho_{shd}^g (Ins^g - \sigma^{s,g,t}) \quad \forall t = t1 \quad (12)$$

$$Csh^{s,g,t} = \rho_{shd}^g (\sigma^{s,g,t-1} - \sigma^{s,g,t}) \quad \forall t > t1 \quad (13)$$

در رابطه‌های (۱۲) و (۱۳)، نشان دهنده هزینه ثابت خاموش کردن واحدها است.

هزینه‌های مربوط به مزارع بادی: هزینه تولید توان در

مزارع بادی در رابطه (۱۴) آمده است که به صورت هزینه‌های ساعتی تولید متناسب با توان خروجی ژنراتورهای بادی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مؤلفه سرعت باد هر سناریو بر توان خروجی توربین‌های بادی اثر می‌گذارد، طبق رابطه (۱۵)، توان خروجی هر توربین بادی به دست می‌آید.

$$cP_w^s = \sum_t \sum_n \rho_w^t P_w^{s,n,t} \quad (14)$$

$$P_w^{s,n,t} = \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot A \cdot V \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، v نشان دهنده سرعت باد است که با یکای Km/h در مسئله در نظر گرفته شده است.

واحدهای نیروگاهی استفاده شده است. مطابق با رابطه (۸)، احتمال هر سناریو، در مقدار هزینه برنامه ریزی مربوط به آن سناریو ضرب می‌شود. گفتنی است در زمان شارژ خودروهای برقی، به دلیل اینکه بهره‌بردار سیستم از مصرف کنندگان هزینه دریافت می‌کند، هزینه‌های دریافتی برای بهره بردار سیستم، سود تلقی می‌شود و از مبلغ هزینه کل کسر می‌شود. بخش دوم تابع هدف نیز مانند آنچه گفته شد، به محاسبه ریسک مالی به روش CVaR مربوط است.

$$\min z = \sum_s \left(Pr_{tot}^s (cP^s + cP_w^s + cP_{pv}^s + cP_{dch}^s - cP_{ch}^s) \right) + \psi (\omega^t + \frac{1}{1-\epsilon^t} \sum_s Pr_{tot}^s \cdot \phi^{t,s}) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، ψ ضریب وزنی است. ضریب وزنی بیان کننده توازن میان شاخص محاسبه ریسک و سود حاصله است که مقدار آن بین $0 \leq \psi \leq \infty$ است. در واقع، هرچه ضریب وزنی کوچک تر انتخاب شود، مقدار ریسک برای سود بیشتر (هزینه برنامه ریزی کمتر)، افزایش می‌یابد؛ بنابراین، انتخاب ضریب وزنی به نوع برنامه ریزی بستگی دارد.

هزینه‌های مربوط به واحدهای نیروگاهی: هزینه تولید

توان در واحدهای نیروگاهی، مطابق با رابطه (۹)، شامل چند قسمت از جمله هزینه‌های سوخت متناسب با توان تولیدی ژنراتورها، هزینه‌های راه‌اندازی و خاموش کردن واحدها است.

$$cP^s = \sum_g \sum_t \rho^{g,t} P^{s,g,t} + Cst^{s,g,t} + Csh^{s,g,t} \quad (9)$$

هزینه راه‌اندازی واحدهای نیروگاهی: هزینه‌های راه‌اندازی واحدهای نیروگاهی که در رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) به آن اشاره شده است، دو بازه زمانی را شامل می‌شوند. بازه زمانی نخست مربوط به ساعات اولیه است که در آن، حالت اولیه ژنراتورها به صورت یک پارامتر ثابت ورودی مسئله (Ins^g) در نظر گرفته می‌شود. حالت فعلی با حالت اولیه مقایسه می‌شود، اگر تغییر حالت از خاموش بودن به روشن بودن واحد صورت گرفته باشد، مشمول هزینه

برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور خودروهای برقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع ...

به تعداد زیاد قیود و سناریوهای بررسی شده، حجم محاسباتی بسیار بالایی دارد؛ بنابراین، برای کاستن پیچیدگی‌های محاسباتی مسئله از مدل پخش بار DC استفاده می‌شود.

قید ظرفیت خطوط انتقال: مطابق با رابطه (۲۰)، خطوط انتقال سیستم قدرت برای انتقال توان تولیدشده در واحدها، ظرفیتی محدود دارند که اگر توان انتقالی از آن مقدار تجاوز کند، به دلیل گرم شدن خطوط، تلفات سیستم افزایش می‌یابد.

$$-l_{mm'}^{\max} \leq \beta^{nm'} \cdot (\delta^{s,n,t} - \delta^{s,n',t}) \leq l_{mm'}^{\max} \quad (20)$$

قید تعادل توان روی باس‌ها: مطابق با رابطه (۲۱)، شرط لازم برای پایداری شبکه این است که در زمان حقیقی، مجموع توان‌های تولیدشده در هر شین (ناشی از واحدهای نیروگاهی یا منابع انرژی تجدیدپذیر یا توان دشارژ خودروها) با مجموع توان‌های مصرف‌شده در آن شین برابر باشند که به صورت بار مصرفی (مصرف کنندگان عادی سیستم یا توان مصرفی شارژ خودروها) ظاهر شده یا وارد خطوط انتقال شده است؛ در این صورت، پایداری شبکه تأمین می‌شود.

$$\left(\sum_g P^{s,g,t} \right) + P_w^{s,n,t} + P_{pv}^{s,n,t} + P_{dch}^{s,n,t} - P_{ch}^{s,n,t} = \sum_{n'} \beta^{nm'} \cdot (\delta^{s,n,t} - \delta^{s,n',t}) + P_D^{n,t} \quad (21)$$

گفتنی است چون محدودیت تعادل توان رابطه (۲۱) برای هر شین اعمال می‌شود، توان تولیدی واحدهای نیروگاهی متصل به آن شین (در صورت وجود) در نظر گرفته می‌شود.

قید ظرفیت تولید توان در واحدهای نیروگاهی: رابطه (۲۲) بیان‌کننده محدودیت تولید توان در واحدهای نیروگاهی است.

$$P_g^{\min} \leq P^{s,g,t} \leq P_g^{\max} \quad (22)$$

قید ظرفیت تولید توان در مزارع بادی: رابطه (۲۳) بیان‌کننده قید تولید توان در مزارع بادی است که در آن، متغیر باینری μ در دو طرف معادله ضرب شده است؛ زیرا در مدل پیشنهادی علاوه بر تعیین میزان تولید مزارع

هزینه‌های مربوط به مزارع خورشیدی: هزینه تولید توان در مزارع خورشیدی در رابطه (۱۶) آورده شده است که به صورت هزینه‌های ساعتی تولید متناسب با توان خروجی مزارع در نظر گرفته شده است. در این رابطه، توان خروجی مزارع با مؤلفه ضریب تابش خورشید (ps_h) در هر سناریو رابطه معکوس دارد.

$$cP_{pv}^s = \sum_t \sum_n \frac{P_{pv}^{s,n,t}}{ps_h} \rho_{pv}^t \quad (16)$$

هزینه‌های مربوط به شارژ و دشارژ ایستگاه‌ها: هزینه‌های شارژ و دشارژ ایستگاه‌های V2g در رابطه‌های (۱۷) و (۱۸) آمده‌اند که به صورت هزینه‌های ساعتی متناسب با مقدار توان شارژ و دشارژ خودروهای برقی در نظر گرفته شده‌اند که طبق شرایط هر سناریو بررسی می‌شوند.

$$cP_{dch}^s = \sum_t \sum_n P_{dch}^{s,n,t} \rho_{dch}^t \quad (17)$$

$$cP_{ch}^s = \sum_t \sum_n P_{ch}^{s,n,t} \rho_{ch}^t \quad (18)$$

محاسبه احتمال هر سناریو: همان‌طور که قبلاً گفته شد، احتمال وقوع هر مؤلفه سناریو بر تابع هدف و به تبع آن بر توان خروجی واحدها اثرگذار است. برای محاسبه احتمال هر سناریو، رابطه (۱۹) در نظر گرفته شده است که احتمال وقوع هر دو مؤلفه سناریو، یعنی سرعت وزش باد و ضریب تابش خورشید را به صورت هم‌زمان شامل می‌شود.

$$Pr_{tot}^s = Pr_w^s \cdot Pr_{pv}^s \quad (19)$$

۶-۲- قیود مسئله

برای حل هر مسئله بهینه‌سازی یکسری محدودیت‌ها وجود دارد که با توجه به دقت و تعداد این محدودیت‌ها جواب‌های بهینه در یک بازه معین محصور می‌شوند. مسئله پیشنهادی برنامه‌ریزی احتمالی سیستم در حضور خودروهای برقی نیز قیودی از نوع مساوی و نامساوی دارد که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد. مسئله برنامه‌ریزی احتمالی سیستم در شبکه‌های مقیاس بزرگ قدرت، با توجه

روابط هنگامی کارآمدند که ایستگاه خودروی برقی روی باس وجود داشته باشد.

$$0 \leq P_{chvehicle}^{s,n,t} \leq U_{chvehicle}^{s,n,t} P_{chvehicle}^{max} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{dchvehicle}^{s,n,t} \leq U_{dchvehicle}^{s,n,t} P_{dchvehicle}^{max} \quad (28)$$

البته به دلیل اینکه خودروهای برقی، هرکدام جزئی از کل یعنی ایستگاه‌اند، باید مجموع توان شارژ خودروهای برقی با توان شارژ ایستگاه برابر باشند؛ به این ترتیب، این رابطه برای توان دشارژ نیز صادق است. به عبارت دیگر باید مجموع توان دشارژ خودروهای برقی نیز با توان دشارژ ایستگاه برابر باشند.

قید میزان شارژ باتری خودروها (SOC): در بحث

خودروهای برقی تأمین کردن ایمنی باتری‌ها اهمیت زیادی دارد که در رابطه (۲۹) به آن اشاره شده است؛ برای مثال، خودرویی را در نظر بگیرید که سطح پایینی از شارژ را درون باتری خود دارد، هنگام ورود به ایستگاه، نیاز به شارژ دارد و نمی‌توان باتری آن را دشارژ کرد؛ همچنین، نمی‌توان بیشتر از اندازه باتری آن را شارژ کرد. اینجاست که محدودیت سطح شارژ باتری استفاده می‌شود.

$$SOC^{min} \leq SOC^{s,n,t} \leq SOC^{max} \quad (29)$$

حالت نهایی شارژ یا دشارژ ایستگاه‌ها: مسئله مهم

دیگر در بحث خودروهای برقی، مطابق با رابطه (۳۰)، مشخص شدن حالت کلی وضعیت شارژ یا دشارژ ایستگاه‌ها است؛ به عبارت دیگر، مشخص شود در کل ایستگاه مربوطه توان به شبکه داده یا توان از شبکه گرفته است. رابطه (۳۰) توان برآیند ایستگاه V2g را محاسبه می‌کند که مثبت بودن آن نشان می‌دهد ایستگاه نسبت به شبکه در حالت دشارژ قرار گرفته و منفی بودن آن بیان‌کننده وضعیت شارژ شدن ایستگاه است.

$$P_{v2g}^{s,n,t} = P_{dch}^{s,n,t} - P_{ch}^{s,n,t} \quad (30)$$

قید انرژی باتری خودروهای برقی در هر ایستگاه:

طبق رابطه‌های (۳۱) و (۳۲)، باتری خودروهای برقی در هر

بادی، این مزارع در شبکه جایابی شده‌اند. مطابق با این رابطه، اگر روی باس مزرعه بادی وجود نداشته باشد، متغیر باینری صفر است؛ در نتیجه، مقدار توان تولیدی مزرعه بادی، صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$W_{cap}^{min} \mu^n \leq P_w^{s,n,t} \leq W_{cap}^{max} \mu^n \quad (23)$$

قید ظرفیت تولید توان در مزارع خورشیدی:

رابطه (۲۴) بیان‌کننده محدودیت تولید توان در مزارع خورشیدی است که در آن، متغیر باینری α^n در دو طرف معادله ضرب شده است؛ زیرا در مدل پیشنهادی علاوه بر تعیین میزان تولید مزارع خورشیدی، این مزارع در شبکه جایابی شده‌اند. طبق این رابطه، اگر روی باس مزرعه خورشیدی وجود نداشته باشد، متغیر باینری صفر است؛ در نتیجه، مقدار توان تولیدی مزرعه خورشیدی، صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$PV_{cap}^{min} . \alpha^n \leq P_{pv}^{s,n,t} \leq PV_{cap}^{max} . \alpha^n \quad (24)$$

قید ظرفیت شارژ / دشارژ ایستگاه‌های خودروی

برقی: طبق رابطه‌های (۲۵) و (۲۶) شارژ و دشارژ ایستگاه‌های V2g نیز محدودیت دارند.

$$0 \leq P_{ch}^{s,n,t} \leq \tau^n . v2gch_{cap} \quad (25)$$

$$0 \leq P_{dch}^{s,n,t} \leq \tau^n . v2gdch_{cap} \quad (26)$$

مانند توضیحات قبل، علت ضرب کردن ظرفیت شارژ و دشارژ خودروها در متغیر باینری τ^n در رابطه‌های (۲۵) و (۲۶) این است که در مدل پیشنهادی علاوه بر تعیین میزان شارژ و دشارژ ایستگاه‌های V2g، این ایستگاه‌ها در شبکه موجود جایابی شده‌اند. مطابق با این روابط، اگر روی باس ایستگاه V2g وجود نداشته باشد، متغیر باینری صفر است؛ در نتیجه، مقدار توان شارژ و دشارژ ایستگاه، صفر در نظر گرفته می‌شود.

قید شارژ / دشارژ خودروهای برقی در هر ایستگاه:

رابطه‌های (۲۷) و (۲۸) نشان‌دهنده محدودیت در شارژ و دشارژ در هر خودروی برقی در ایستگاه‌ها هستند. این

برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور خودروهای برقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع ...

قید تعداد مزارع بادی: قید تعداد مزارع بادی طبق رابطه (۳۵) در نظر گرفته شده است که در آن، N_w تعداد مزارع بادی است.

$$\sum_n \mu^n = N_w \quad (35)$$

قید تعداد مزارع خورشیدی: رابطه (۳۶)، قید مربوط به تعداد مزارع خورشیدی را نشان می‌دهد که در آن، N_{pv} تعداد مزارع خورشیدی است.

$$\sum_n \alpha^n = N_{pv} \quad (36)$$

قید تعداد ایستگاه‌های خودروهای برقی: قید تعداد ایستگاهها طبق رابطه (۳۷) در نظر گرفته شده است که در آن، $N_{station}$ بیان‌کننده تعداد ایستگاه‌های V2g است.

$$\sum_n \tau^n = N_{station} \quad (37)$$

قید تعداد خودروهای برقی درون ایستگاه‌ها: قید تعداد خودروهای برقی درون هر ایستگاه طبق رابطه (۳۸) در نظر گرفته شده است که در آن، $N_{vehicle}$ تعداد خودروهای برقی است.

$$\sum_n U_{totvehicle}^{s,n,t} = N_{vehicle} \quad (38)$$

با توجه به روابط (۳۵-۳۷)، متغیرهای باینری مربوط به جایابی بهینه، اندیس‌های زمان و سناریو ندارند و فقط اندیس شماره شین را دارند؛ یعنی محل تعیین شده برای ایستگاه‌های V2g و واحدهای بادی و خورشیدی ثابت است و در طول زمان و سناریوهای مختلف تغییر نمی‌کند.

۳- نتایج عددی

در این مقاله، محاسبات برنامه ریزی سیستم قدرت در بازه زمانی ۴ ساعت و با ۱۰۰ عدد سناریوی تولیدشده برای سرعت وزش باد و تابش خورشید با توزیع نرمال، انجام شده است. مطابق با شکل (۱)، شبکه اصلاح شده ۲۴ باسه IEEE شامل دو مزرعه بادی، سه مزرعه خورشیدی و سه ایستگاه V2g به‌عنوان شبکه نمونه بررسی شده برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی استفاده شده است.

ایستگاه حدود ۴ ساعت می‌تواند حداکثر توان خود را چه در حالت شارژ و چه در حالت دشارژ برای شبکه حفظ کند.

$$0 \leq \sum_t P_{chvehicle}^{s,n,t} \leq 4. P_{chvehicle}^{max} \quad (31)$$

$$0 \leq \sum_t P_{dchvehicle}^{s,n,t} \leq 4. P_{dchvehicle}^{max} \quad (32)$$

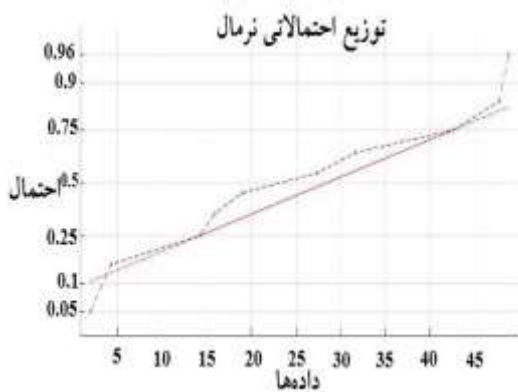
قید حالت شارژ، دشارژ یا حالت اتصال نداشتن به شبکه ساعتی هر خودروی برقی: طبق رابطه (۳۳)، در هر ساعت هر خودروی برقی درون شبکه در هر ایستگاه می‌تواند به شبکه متصل باشد؛ چه در حالت شارژ یا دشارژ باشد یا به شبکه متصل نباشد. طبق رابطه (۳۳)، اگر مجموع حالت‌ها برابر ۱ شود، یعنی خودروی برقی به شبکه متصل است؛ چه در حالت شارژ و چه در حالت دشارژ باشد و اگر این مجموع برابر با صفر شود، یعنی خودروی برقی به شبکه متصل نیست و تبادل انرژی با شبکه ندارد. گفتنی است این قید هنگامی وارد مسئله می‌شود که متغیر باینری مربوط به وجود ایستگاههای خودروی برقی، یعنی τ^n ، برابر ۱ باشد یا به عبارت دیگر، ایستگاه روی باس قرار داشته باشد.

$$U_{chvehicle}^{s,n,t} + U_{dchvehicle}^{s,n,t} + U_{idlevehicle}^{s,n,t} = U_{totvehicle}^{s,n,t} \quad (33)$$

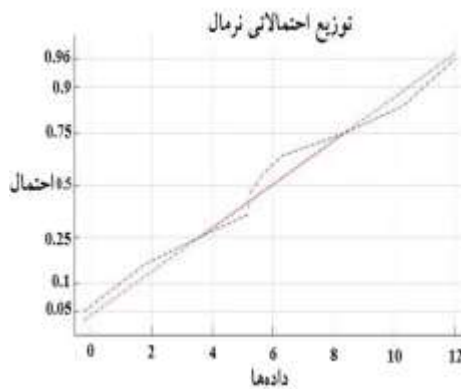
قید تعادل ساعتی انرژی در باتری خودروهای برقی در هر ایستگاه: رابطه (۳۴)، تعادل انرژی باتری‌های خودروهای برقی را نشان می‌دهد. شایان ذکر است رابطه (۳۴) در صورتی وارد مسئله می‌شود که روی باس ایستگاه خودروی برقی وجود داشته باشد.

$$E_{vehicle}^{s,n,t} = E_{invehicle} + \sum_t (U_{dchvehicle}^{s,n,t} P_{dchvehicle}^{s,n,t} \eta_{dch} - U_{chvehicle}^{s,n,t} P_{chvehicle}^{s,n,t} \eta_{ch}) - \sum_t (1 - U_{totvehicle}^{s,n,t}) E_{Dvehicle}^t \quad (34)$$

بعد از تعیین ظرفیت تولید توان در منابع انرژی تجدیدپذیر و تعیین ظرفیت شارژ و دشارژ ایستگاه‌ها و خودروهای برقی، باید تعداد آنها را معین کرد. قیود بعدی بیان‌کننده محدودیت در تعدادند.



شکل (۲): توزیع نرمال مؤلفه سرعت

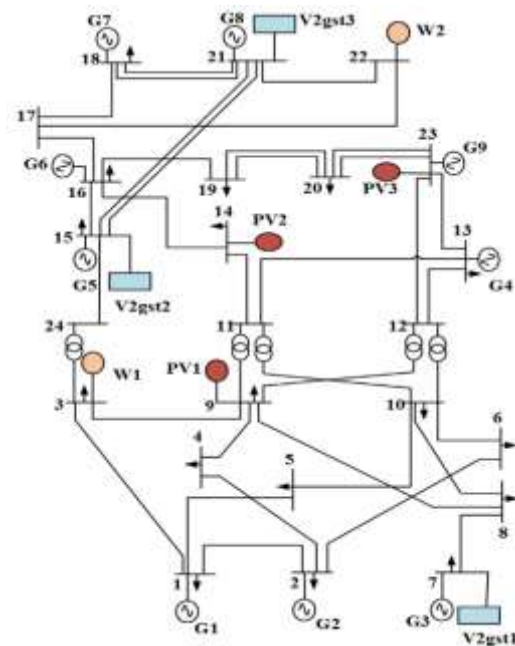


شکل (۳): توزیع نرمال مؤلفه ضریب تابش خورشید

جدول (۲): میانگین و انحراف معیار مؤلفه‌های سناریوها پس از نرمالیزه کردن

	میانگین (Mean)	انحراف معیار (STD)
مؤلفه سرعت باد (Km/h)	۲۰	۱۳/۱
مؤلفه ضریب تابش	۴/۵	۲/۱
خورشید (Kwh/m ²)		

به منظور بررسی اثرات میزان سرعت باد و میزات تابش خورشید^{۱۶} بر هزینه برنامه‌ریزی سیستم برای پنج سناریوی متفاوت تولیدشده که در جدول (۳) نمایش داده شده‌اند، محاسبات مربوط به برنامه‌ریزی سیستم انجام شده است. با بررسی نتایج حاصل درمی‌یابیم با افزایش سرعت باد و همچنین، افزایش ضریب تابش خورشید، هزینه‌های برنامه‌ریزی شبکه کاهش می‌یابد. در جدول (۳) و شکل (۴) پنج سناریوی بررسی شده و هزینه‌های بهره‌برداری ایجادشده در شرایط آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. گفتنی است علت



شکل (۱): شبکه اصلاح‌شده ۲۴ باسه IEEE شامل مزارع بادی و خورشیدی و ایستگاه‌های v2g

به منظور تولید سناریوهای مربوط به سرعت باد و ضریب تابش خورشید، از اطلاعات واقعی منطقه تگزاس در بازه سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۹ میلادی استفاده شده است. به این منظور، اطلاعات مربوط به سرعت باد، تابش خورشید و قیمت بازار، از بازار شورای قابلیت اطمینان الکتریکی تگزاس (ERCOT)^{۱۷} دریافت شده است [۲۹]. به دلیل اینکه توزیع احتمالی مربوط به این داده‌ها لزوماً نرمال نیست، از روش‌های نرمالیزه کردن داده‌ها استفاده می‌شود. توزیع احتمالی نرمال مؤلفه‌های سناریوها (سرعت وزش باد و ضریب تابش خورشید)، هماهنگی و همخوانی مقادیر حاصله به هنگام نوسان حول یک مقدار خاص (میانگین) با معیار پراکندگی مشخص (انحراف معیار) را نشان می‌دهد. منحنی توزیع احتمالی نرمال مؤلفه‌های سناریوهای تولیدشده، در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، توزیع احتمالی نرمال شامل پارامترهای میانگین و انحراف معیار است. میانگین و انحراف معیار مؤلفه‌های سناریوهای تولیدشده (سرعت وزش باد و ضریب تابش خورشید)، در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور خودروهای برقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع ...

مورد مطالعه ۲: برنامه ریزی سیستم در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و نبود ایستگاه‌های V2g
 مورد مطالعه ۳: برنامه ریزی سیستم در نبود منابع انرژی تجدیدپذیر و نبود ایستگاه‌های V2g

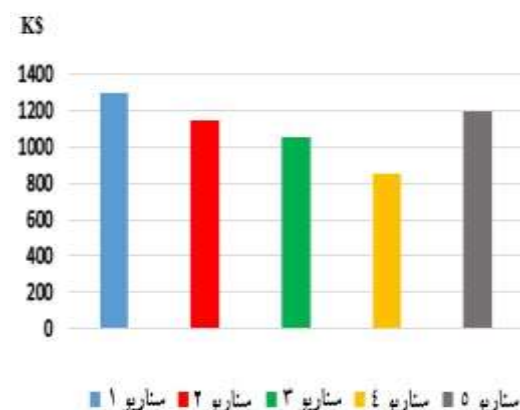
انتخاب پنج سناریوی منتخب از بین سناریوهای کاهش داده شده این است که تأثیر کاهش یا افزایش سرعت وزش باد و نیز ضریب تابش خورشید بر هزینه برنامه ریزی شبکه مشاهده شود. همچنین در این بخش، ریسک ناشی از عدم قطعیت‌های سیستم در نظر گرفته نشده است.

۱-۳- مورد مطالعه ۱ (مدل جامع) بدون در نظر گرفتن ریسک

با توجه به شکل (۱)، با حل مسئله برنامه ریزی سیستم برای مورد مطالعه ۱ محل بهینه مزارع خورشیدی در شین‌های ۹، ۱۴ و ۲۳، مزارع بادی به ترتیب در شین‌های ۳ و ۲۲ و ایستگاه‌های V2g در شین‌های ۷، ۱۵ و ۲۱ جایابی شده‌اند. تعدادی از متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله شامل توان خروجی واحدهای نیروگاهی، توان خروجی مزارع بادی و خورشیدی، توان شارژ و دشارژ ایستگاه‌های V2g برای مورد مطالعه ۱، در شرایط سناریوی اول (جدول ۳) و در ساعت پیک بار (ساعت اول) در جدول (۴) نمایش داده شده‌اند. همچنین، نمودار دایره‌ای تولید توان منابع انرژی شبکه (واحدهای نیروگاهی، مزارع خورشیدی، مزارع بادی، شارژ و دشارژ ایستگاه‌های V2g) در شکل (۵) ارائه شده است.

جدول (۳): چند نمونه از سناریوها با معرفی مؤلفه‌های آنها

ضریب تابش (Kwh/m ²)	سرعت باد (Km/h)	سناریو
۴/۳۳	۱۰/۵۰	سناریو ۱
۴/۹۱	۲۷/۸۷	سناریو ۲
۶/۲۳	۳۸/۱۴	سناریو ۳
۷/۲۰	۵۹/۶۴	سناریو ۴
۴/۴۰	۱۲/۱۷	سناریو ۵



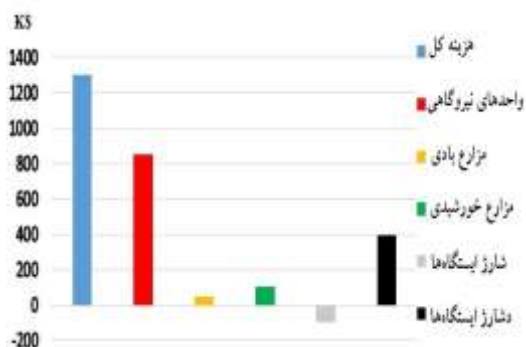
جدول (۴): مقادیر تعدادی از متغیرهای مسئله در شرایط سناریوی اول و در ساعت اول (ساعت اوج مصرف)

مقدار توان (MW)	توان خروجی واحدهای نیروگاهی
۱۰۲۰/۴۶	توان خروجی واحدهای نیروگاهی
۱۲۰/۱۰	توان خروجی مزرعه‌های بادی
۲۱۰/۰۵	توان خروجی مزرعه‌های خورشیدی
۲۱/۳۴	توان شارژ ایستگاه‌ها
۲۳/۱۷	توان دشارژ ایستگاه‌ها

شکل (۴): مقایسه چند نمونه از هزینه‌های برنامه‌ریزی کل شبکه بدون در نظر گرفتن ریسک در شرایط سناریوهای مختلف

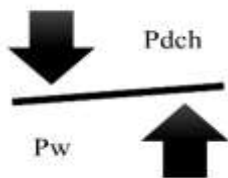
به منظور ارزیابی اثرات حضور ایستگاه‌های V2g در پوشش عدم قطعیت میزان تولید مزارع بادی و خورشیدی و همچنین، بررسی اثرات حضور تولیدات پراکنده بر برنامه ریزی سیستم قدرت سه مورد مطالعه زیر تعریف شده‌اند که نتایج حاصل از شبیه‌سازی این سه مورد مطالعه با یکدیگر مقایسه و تحلیل شده‌اند:

مورد مطالعه ۱: برنامه ریزی سیستم در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و ایستگاه‌های V2g

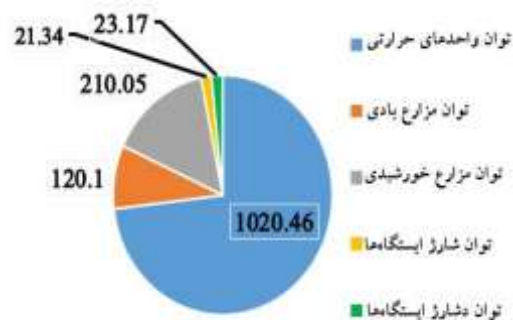


شکل (۶): مؤلفه‌های هزینه برنامه‌ریزی شبکه بدون در نظر گرفتن ریسک در شرایط سناریوی اول و در ساعت پیک بار

رابطه بین توان دشارژ ایستگاه‌های خودروی برقی و توان خروجی مزارع بادی، در شکل (۷) و نیز منحنی تغییرات توان خروجی توربین‌های بادی و توان دشارژ ایستگاه‌های V2g برحسب میزان سرعت باد (در شرایط سناریوهای مختلف) در شکل (۸) نمایش داده شده‌اند. مطابق با شکل (۸)، در زمان افت سرعت باد روزانه و کاهش توان خروجی توربین‌های بادی، توان دشارژ ایستگاه‌ها به تدریج زیاد می‌شود تا جایی که کمبود توان شبکه را جبران کند. همچنین، عکس قضیه نیز صادق است؛ یعنی با افزایش توان خروجی واحدهای بادی، توان دشارژ ایستگاه‌ها به حداقل مقدار خود می‌رسد، در عوض از توان اضافی تولیدشده توسط واحدها برای شارژ خودروها استفاده می‌شود. در حقیقت، خودروهای برقی در پوشش عدم قطعیت تولید منابع انرژی تجدیدپذیر به‌ویژه نیروگاه بادی بسیار مؤثر عمل می‌کنند.



شکل (۷): رابطه بین توان دشارژ ایستگاه‌های خودروی برقی و توان خروجی مزارع بادی



شکل (۵): نمودار دایره‌ای تولید توان منابع انرژی در شرایط سناریوی اول و در ساعت پیک بار

مؤلفه‌های مختلف بخش اول تابع هدف، یعنی هزینه برنامه‌ریزی شبکه شامل هزینه‌های تولید توان در واحدهای نیروگاهی، هزینه‌های تولید توان در مزارع بادی و خورشیدی، هزینه‌های شارژ و دشارژ ایستگاه‌های V2g برای مورد مطالعه ۱، در شرایط سناریوی اول و در ساعت پیک بار، در جدول (۵) و شکل (۶) ارائه شده‌اند. گفتنی است علامت مثبت بیان‌شده در جدول (۵)، نشان‌دهنده هزینه‌های تولید انرژی و علامت منفی نشان‌دهنده سود حاصله از فروش انرژی است.

جدول (۵): مؤلفه‌های هزینه برنامه‌ریزی شبکه بدون در نظر گرفتن ریسک در شرایط سناریوی اول و در ساعت پیک بار

مقدار هزینه برحسب (K\$)	
۱۳۰۱/۲	هزینه کل بهره‌برداری بدون در نظر گرفتن ریسک
۸۵۰/۳۵	هزینه تولید توان در واحدهای نیروگاهی
۵۰/۰۳	هزینه تولید توان در مزارع بادی
۱۰۱/۴۷	هزینه تولید توان در مزارع خورشیدی
-۹۸/۳۱	هزینه شارژ ایستگاهها
۳۹۶/۶۶	هزینه دشارژ ایستگاهها

برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور خودروهای برقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع ...

سوم)، ایستگاه‌ها تغییر وضعیت می‌دهند و در وضعیت شارژ قرار می‌گیرند و از شبکه توان جذب می‌کنند. در حقیقت، علاوه بر پوشش عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر، ایستگاه‌های V2g نقش سازنده‌ای در هموارکردن منحنی بار و در نتیجه، کاهش هزینه‌های مربوط به راه‌اندازی و خاموش کردن واحدهای نیروگاهی دارند.

جدول (۶): وضعیت تبادل توان خودروی برقی با شبکه (+۱: دشارژ به شبکه، -۱: شارژ از شبکه و ۰: اتصال‌نداشتن به شبکه)

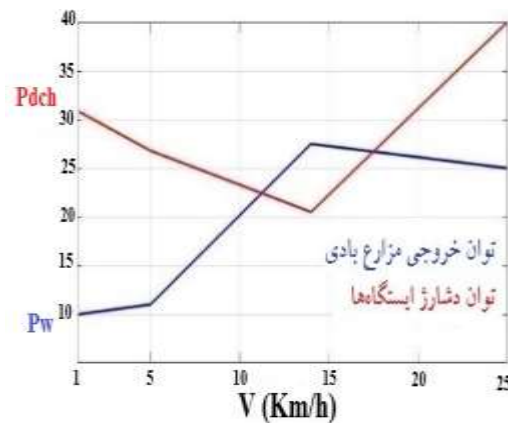
	ساعت ۱	ساعت ۲	ساعت ۳	ساعت ۴
خودرو ۱	+۱	۰	۰	-۱
خودرو ۲	+۱	+۱	+۱	+۱
خودرو ۳	۰	۰	۰	+۱
خودرو ۴	-۱	-۱	۰	+۱
خودرو ۵	+۱	۰	۰	+۱

جدول (۷): توان برآیند ساعتی ایستگاه‌های V2g در شرایط سناریوی اول (عدد مثبت بیان‌کننده دشارژ به شبکه و عدد منفی بیان‌کننده شارژ از شبکه است)

توان دشارژ ایستگاه‌های V2g (KW) به شبکه	
ساعت اول	۱۸۳۰
ساعت دوم	-۷۸۰/۴۱
ساعت سوم	-۱۴۶۴
ساعت چهارم	۳۰۰۱/۱۴

۲-۳- مقایسه سه مورد مطالعه بدون در نظر گرفتن ریسک

شایان ذکر است در انجام شبیه‌سازی‌های مربوط به موارد مطالعه ۲ و ۳، در مورد مطالعه ۲ که از خودروهای برقی صرف‌نظر شده است، فقط جایابی مزارع بادی و خورشیدی انجام می‌شود و در مورد مطالعه ۳ که از منابع انرژی تجدیدپذیر نیز صرف‌نظر شده است، هیچ جایابی انجام نمی‌شود. بخش نخست تابع هدف، یعنی هزینه‌های برنامه‌ریزی کل شبکه، بدون در نظر گرفتن ریسک برای سه مورد مطالعه در شکل (۹) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



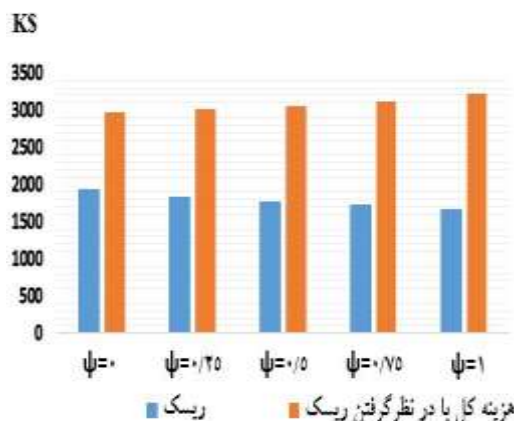
شکل (۸): مقایسه توان خروجی مزرعه‌های بادی و توان دشارژ ایستگاه‌ها

برای بررسی حالت اتصال هر خودروی برقی به شبکه، در حالت شارژ، دشارژ یا اتصال‌نداشتن به شبکه، جدول (۶) در نظر گرفته شده است. به این منظور، از بین تمامی خودروهای موجود درون ایستگاه اول، تعداد ۵ خودرو به صورت کاملاً تصادفی، انتخاب و در ۴ ساعت حالات مختلف آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. عدد +۱ درون جدول بیان‌کننده حالت دشارژ به شبکه، عدد -۱ بیان‌کننده حالت شارژ از شبکه و عدد ۰ درون جدول بیان‌کننده حالت اتصال‌نداشتن به شبکه است. همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، در ساعات اوج مصرف (ساعات اول و چهارم) بیشتر خودروها در حالت دشارژ توان به شبکه قرار گرفته‌اند؛ برای مثال، در ساعت چهارم هر پنج خودروی انتخابی با شبکه تبادل توان دارند. از میان پنج خودروی انتخابی، تنها خودروی اول در حالت شارژ از شبکه قرار گرفته است و چهار خودروی دیگر به شبکه توان تزریق می‌کنند. همچنین، توان برآیند ایستگاه‌های V2g در ساعات مختلف بازه برنامه‌ریزی و در شرایط سناریوی اول در جدول (۷) ارائه شده است. با توجه به اینکه توان برآیند ایستگاه‌ها از تفاضل توان دشارژ و توان شارژ ایستگاه‌ها حاصل می‌شود، مثبت بودن عدد به دست آمده نشان‌دهنده وضعیت دشارژ ایستگاه‌ها و منفی بودن عدد نشان‌دهنده وضعیت شارژ ایستگاه‌ها است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ساعات پرباری (ساعات اول و چهارم) ایستگاه‌ها در وضعیت دشارژ قرار دارند و توان به شبکه تزریق می‌کنند و به نوعی کمبود توان تولیدی واحدها را جبران می‌کنند؛ اما در ساعات کم‌باری (ساعات دوم و

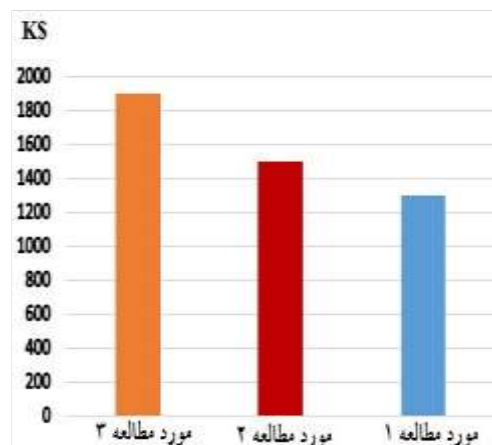
جدول (۸): ارزیابی ریسک و هزینه کل برنامه ریزی شبکه با در نظر گرفتن ریسک برحسب ضرایب وزنی متفاوت

ضریب وزنی	ریسک (K\$)	هزینه کل با در نظر گرفتن ریسک (K\$)
$\psi=0$	۱۹۳۰/۰۵	۲۹۶۹/۳۱
$\psi=0/25$	۱۸۲۰/۳۴	۳۰۱۳/۴۱
$\psi=0/5$	۱۷۶۱/۵۱	۳۰۶۱/۷۱
$\psi=0/75$	۱۷۱۳/۲۱	۳۱۲۰/۵۴
$\psi=1$	۱۶۶۹/۱۱	۳۲۳۰/۲۵

همان‌طور که در این شکل نمایش داده شده است، هزینه‌های بهره‌برداری کل شبکه در مورد مطالعه ۱ در مقایسه با مورد مطالعه ۲ به اندازه ۱۳٪ کاهش یافته است. علت این کاهش هزینه پوشش عدم قطعیت تولید مزارع بادی و خورشیدی با شارژ و دشارژ بهینه ایستگاه‌های V2g است. با توجه به شکل (۹)، هزینه‌های بهره‌برداری کل شبکه در مورد مطالعه ۲ در مقایسه با مورد مطالعه ۳ به اندازه ۲۱٪ کاهش یافته است. این کاهش ناشی از کاهش تولید واحدهای نیروگاهی به دلیل افزایش تولید مزارع خورشیدی و بادی با هزینه جاری خیلی کم است.



شکل (۱۰): ارزیابی ریسک و هزینه کل برنامه ریزی شبکه با در نظر گرفتن ریسک برحسب ضرایب وزنی متفاوت



شکل (۹): مقایسه هزینه‌های برنامه ریزی کل شبکه بدون در نظر گرفتن ریسک برای مورد مطالعه‌های مختلف

۳-۳- تحلیل ریسک

مقادیر مختلف ریسک محاسبه شده و نیز هزینه کل برنامه ریزی شبکه با در نظر گرفتن ریسک ناشی از عدم قطعیت های مسئله در جدول (۸) و شکل (۱۰) ارائه شده‌اند. گفتنی است مقادیر به‌ازای ضرایب وزنی متفاوت محاسبه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود و در بخش‌های قبلی نیز به آن اشاره شد، با افزایش ضریب وزنی، ریسک مالی ناشی از عدم قطعیت‌های مسئله کاهش می‌یابد. این بدان معناست که هرچه ضریب وزنی بزرگ‌تر انتخاب شود، هزینه بهره‌برداری بیشتر (سود کمتر) به‌ازای ریسک کمتر به دست می‌آید؛ به عبارت دیگر، با انتخاب ضریب وزنی کوچک‌تر، هزینه برنامه ریزی کمتر (سود بیشتر) اما در ازای ریسک مالی بیشتر به دست می‌آید.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، حل مسئله برنامه ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر شامل مزارع خورشیدی و بادی و همچنین، ایستگاه‌های خودروهای برقی بررسی شده است. جایابی بهینه مزارع خورشیدی و بادی و ایستگاه‌های V2g نیز تعیین شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مسئله و مقایسه با نتایج برنامه ریزی شبکه بدون حضور ایستگاه‌های V2g نشان می‌دهد وجود ایستگاه‌های V2g نقش بسیار مؤثری در جبران عدم قطعیت تولید منابع انرژی تجدیدپذیر دارند؛ به این صورت که هنگام کاهش سرعت باد و میزان تابش خورشید، ایستگاه‌ها ظرفیت دشارژ خود را تحویل شبکه می‌دهند و هنگام افزایش سرعت باد و تابش خورشید و به تبع آن، افزایش توان خروجی واحدهای تجدیدپذیر، میزان توان دشارژ خود را کاهش می‌دهند و در

عوض از توان مازاد تولید شده برای شارژ خودروها استفاده می‌کند. همچنین، ایستگاه‌های V2g نقش سازنده ای در هموارکردن منحنی بار و کاهش هزینه‌های راه‌اندازی و خاموش کردن واحدهای نیروگاهی دارند؛ در نتیجه، هزینه‌های برنامه‌ریزی سیستم را کاهش می‌دهند. در انتها بررسی موارد زیر برای ادامه روند تحقیقات موضوع این مقاله پیشنهاد می‌شود:

- تأثیر حضور هم‌زمان و هماهنگ ایستگاه‌های V2g و ذخیره‌سازهای انرژی بر عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر.
- تأثیر حضور ایستگاه‌های V2g در برنامه‌ریزی یکپارچه شبکه‌های برق و گاز.

فهرست اصطلاحات

اندیس	تعریف اندیس
g	نشان‌دهنده ژنراتورها؛
n	نشان‌دهنده باس (شین)؛
p	مرتبه مدل اتورگرسیو (AR)؛
q	مرتبه مدل میانگین حرکتی (MA)؛
S, S'	نشان‌دهنده سناریو؛
t	نشان‌دهنده زمان؛
پارامتر	تعریف پارامتر
A	مساحت جاروب شده با توربین بادی (m^2)؛
$d^{s,s'}$	فاصله برداری بین دو سناریو s و s' ؛
$E_{invehicle}$	انرژی اولیه موجود در باتری هر خودروی برقی (KW)؛
$E_{Dvehicle}^t$	انرژی برای راندن هر خودروی برقی (KW)؛
G^t	سری زمانی؛
Ins^g	حالت اولیه واحدهای نیروگاهی؛
I_{nm}^{max}	حداکثر ظرفیت خطوط انتقال (MW)؛
$Mean^{w,pv}$	میانگین سرعت باد/ ضریب تابش خورشید؛
N_w	تعداد مزارع بادی؛
N_{pv}	تعداد مزارع خورشیدی؛
$N_{station}$	تعداد ایستگاه‌های خودروی برقی؛
$N_{vehicle}$	تعداد خودروهای برقی در هر ایستگاه؛
P_g^{min}	حداقل ظرفیت تولید واحد نیروگاهی (MW)؛
P_g^{max}	حداکثر ظرفیت تولید واحد نیروگاهی (MW)؛
PV_{cap}^{min}	حداقل ظرفیت تولید مزرعه خورشیدی (MW)؛
PV_{cap}^{max}	حداکثر ظرفیت تولید مزرعه خورشیدی (MW)؛
$P_{chvehicle}^{max}$	حداکثر توان شارژ هر خودروی برقی (KW)؛
$P_{dchvehicle}^{max}$	حداکثر توان دشارژ هر خودروی برقی (KW)؛
Pr_w^s	احتمال وقوع مؤلفه سرعت وزش باد؛
Pr_{pv}^s	احتمال وقوع مؤلفه ضریب تابش خورشید؛
Pr_{tot}^s	احتمال وقوع هر سناریو؛
$PRF^{t,s}$	سود حاصله (K\$)؛
SOC^{min}	حداقل سطح شارژ باتری (KW)؛
SOC^{max}	حداکثر سطح شارژ باتری (KW)؛
$STD^{w,pv}$	انحراف معیار سرعت باد/ ضریب تابش؛
V	سرعت وزش باد (Km/h)؛
$v2gch_{cap}$	ظرفیت شارژ ایستگاه V2g (MW)؛
$v2gdch_{cap}$	ظرفیت دشارژ ایستگاه V2g (MW)؛
W_{cap}^{min}	حداقل ظرفیت تولید مزرعه بادی (MW)؛
W_{cap}^{max}	حداکثر ظرفیت تولید مزرعه بادی (MW)؛
$\rho^{g,t}$	هزینه‌های ساعتی تولید واحدهای نیروگاهی؛
ρ_{st}^g	هزینه‌های ثابت راه‌اندازی واحدهای نیروگاهی؛
ρ_{shd}^g	هزینه‌های ثابت خاموش کردن واحدهای نیروگاهی؛
ρ_w^t	هزینه‌های ساعتی تولید مزرعه بادی؛
ρ_{ch}^t	هزینه‌های ساعتی شارژ خودروی برقی؛
ρ_{dch}^t	هزینه‌های ساعتی دشارژ خودروی برقی؛
η_{ch}	بازده شارژ هر خودروی برقی؛
η_{dch}	بازده دشارژ هر خودروی برقی؛
λ	چگالی هوا (Kg/m^3)؛

متغیر باینری نشان‌دهنده حالت شارژ خودروی برقی در هر ایستگاه؛	$U_{chvehicle}^{s,n,t}$	سوسپتانس خطوط انتقال؛	β^{mn}
متغیر باینری نشان‌دهنده حالت دشارژ خودروی برقی در هر ایستگاه؛	$U_{dchvehicle}^{s,n,t}$	وایت نویز (نویز سفید)؛	ζ^t
متغیر باینری نشان‌دهنده حالت اتصال‌نداشتن به شبکه خودروی برقی در هر ایستگاه؛	$U_{idlevehicle}^{s,n,t}$	شاخص ریسک؛	ω^t
تابع هدف (هزینه)؛	Z	سطح اطمینان؛	ε^t
زاویه ولتاژ روی باس‌ها؛	$\delta^{s,n,t}$	ضریب وزنی	ψ
متغیر باینری نشان‌دهنده حالت ژنراتور (۱: روشن‌بودن واحد نیروگاهی، ۰: خاموش‌بودن واحد نیروگاهی)؛	$\sigma^{s,g,t}$	تعریف متغیر	متغیر
متغیر باینری نشان‌دهنده وجود مزرعه بادی روی باس (۱: وجود مزرعه بادی، ۰: وجودنداشتن مزرعه بادی روی باس)؛	μ^n	هزینه‌های مربوط به واحدهای نیروگاهی؛	CP^s
متغیر باینری نشان‌دهنده وجود مزرعه خورشیدی روی باس (۱: وجود مزرعه خورشیدی، ۰: وجودنداشتن مزرعه خورشیدی روی باس)؛	α^n	هزینه راه‌اندازی واحدهای نیروگاهی؛	$Cst^{s,g,t}$
متغیر باینری نشان‌دهنده وجود ایستگاه V2g (۱: وجود ایستگاه V2g و وجودنداشتن ایستگاه V2g روی باس)؛	τ^n	هزینه خاموش‌کردن واحدهای نیروگاهی؛	$Csh^{s,g,t}$
ضریب مدل اتورگرسیو (AR)؛	ϕ^p	هزینه‌های مربوط به واحدهای نیروگاهی؛	CP^s
ضریب مدل میانگین حرکتی (MA)؛	γ^q	هزینه‌های مربوط به مزارع بادی؛	CP_w^s
تفاضل شاخص ریسک و سود حاصله؛	$\phi^{t,s}$	هزینه‌های مربوط به مزارع خورشیدی؛	CP_{pv}^s
		هزینه‌های مربوط به شارژ ایستگاه‌ها؛	CP_{ch}^s
		هزینه‌های مربوط به دشارژ ایستگاه‌ها؛	CP_{dch}^s
		انرژی موجود در باتری هر خودروی برقی؛	$E_{vehicle}^{s,n,t}$
		فاصله کانترویچ؛	$KD^{s,s'}$
		توان خروجی واحدهای نیروگاهی در هر سناریو (MW)؛	$P^{s,g,t}$
		توان خروجی مزرعه بادی در هر سناریو (MW)؛	$P_w^{s,n,t}$
		توان خروجی مزرعه خورشیدی در هر سناریو (MW)؛	$P_{pv}^{s,n,t}$
		توان شارژ ایستگاه V2g (MW)؛	$P_{ch}^{s,n,t}$
		توان دشارژ ایستگاه V2g (MW)؛	$P_{dch}^{s,n,t}$
		توان شارژ هر خودروی برقی (KW)؛	$P_{chvehicle}^{s,n,t}$
		توان دشارژ هر خودروی برقی (KW)؛	$P_{dchvehicle}^{s,n,t}$
		سطح شارژ باتری خودروی برقی (KW)؛	$SOC^{s,n,t}$
		متغیر باینری نشان‌دهنده اتصال خودروی برقی به شبکه و تبادل انرژی با آن (۱: اتصال خودروی برقی، ۰: اتصال‌نداشتن خودروی برقی به شبکه در هر ایستگاه)؛	$U_{totvehicle}^{s,n,t}$

مراجع

- [1] H. Quan, D. Srinivasan, A. Khosravi, Incorporating wind power forecast uncertainties into stochastic unit commitment using neural network-based prediction intervals, IEEE Transactions on neural networks and learning systems, Vol. 26, No. 9, pp. 2123-2135, 2015.
- [2] J. Shi, W.J. Lee, X. Liu, Generation scheduling optimization of wind-energy storage system based on wind power output fluctuation features, IEEE

- uncertain market prices and demands, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 113, Vol. 48, No. 4, pp. 528-538, 2019.
- [11] M.J.E. Alam, M. Muttaqi, A. Sutanto, Effective utilization of available PEV battery capacity for mitigation of solar PV impact and grid support with integrated V2G functionality, *IEEE Transactions on smart grid*, Vol. 7, No. 3, pp. 1562-1571, 2016.
- [12] C. Jie, Z. Yueya, S. Wencong, An anonymous authentication scheme for plugin electric vehicles joining to charging/discharging station in vehicle-to-grid (V2G) networks, *Smart grid communication*, Vol. 12, No. 3, pp. 9-19, 2015.
- [13] N. Saxena, B.J. Choi, Authentication scheme for flexible charging and discharging of mobile vehicles in the V2G networks, *Journal of latex classfiles*, Vol. 11, No. 7, pp. 1438-1452, 2016.
- [14] A. Alavi Eshkaftaki, A. Ghiasian, A. Rabiee, Smart charge and discharge scheduling of electric vehicle (EV) to maximize the profit of EV owner, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 75-82, 2017.
- [14] M.H. Amini, M. Parsa Moghaddam, Simultaneous optimal placement of distributed generation and electric vehicle parking lots based on probabilistic EV model, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 1-14, 2013.
- [17] Kh. Gorgani Firouzjah, P. Hosseinzadeh, Economic charging of plug-in electric vehicles at the charging station and its evaluation in distribution network considering possible scenarios, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 29-48, 2018.
- [17] D. Liu, Q. Zhong, Y. Wang, G. Liu, Modeling and control of a V2G charging station based on synchronverter technology, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 326-338, 2018.
- [18] H. Rashidizadeh-Kermani, M. Vahedipour-Dahraie, M. Shafie-khah, João P.S. Catalão, A bi-level risk-Transactions on industry applications, Vol. 54, No. 1, pp. 10-17, 2018.
- [3] V. Amir, M. Azimian, Sh. Haddadipour, Operating some multi-microgrids with different energy carriers considering uncertainty, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 69-86, 2019.
- [4] S. Talari, M. Yazdaninejad, M. R. Haghifam, Stochastic-based scheduling of the microgrid operation including wind turbines, photovoltaic cells, energy storages and responsive loads, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 9, No. 12, pp. 1498-1509, 2015.
- [5] E. Du, N. Zang, B. Hodge, et al., Operation of a high renewable penetrated power system with CSP plants: A look-ahead stochastic unit commitment model, *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 34, No. 1, pp. 140-151, 2019.
- [6] D.P. Wang, L. Goel, P.C. Loh, Q. Wu, Long-term reserve expansion of power systems with high wind power penetration using universal generating function methods, *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 26, No. 2, pp. 766-774, 2010.
- [7] X.Y. Ma, Y.Z. Sun, H.L. Fang, Scenario generation of wind power based on statistical uncertainty and variability, *IEEE Transactions on sustainable energy*, Vol. 4, No. 4, pp. 894-904, 2013.
- [8] R. Morsali asl, S.J. Seyedshanaava, Unit commitment for power system with Renewable resources considering uncertainties of load and generation, 4th International Conference on emerging trends in energy conservation, Tehran, Iran, 2015.
- [9] M.A. Abdullah, K.M. Muttaqi, D. Sutanto, A.P. Agalgaonkar, An effective power dispatch control strategy to improve generation schedulability and supply reliability of a wind farm using a battery energy storage system, *IEEE Transactions on sustainable energy*, Vol. 6, No. 3, pp. 1093-1102, 2015.
- [10] H. Rashidizadeh-Kermani, M. Vahedipour-Dahraie, M. Shafie-khah, Joao P.S. Catalao, Stochastic programming model for scheduling demand response aggregators considering

- [24] H. V. Haghi and Z. Qu, A Kernel-Based Predictive Model of EV Capacity for Distributed Voltage Control and Demand Response, *IEEE Transactions on smart grid*, Vol. 9, No. 4, pp. 3180–3190, 2018.
- [25] S. Pirouzi, J. Aghaei, M. A. Latify, G. R. Yousefi, G. Mokryani, A Robust Optimization Approach for Active and Reactive Power Management in Smart Distribution Networks Using Electric Vehicles, *IEEE Systems Journal*, Vol. 12, No. 3, pp. 2699-2710, 2018.
- [26] S. Kamalinia, L. Wu, and M. Shahidehpour, “Stochastic midterm coordination of hydro and natural gas flexibilities for wind energy integration,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 5, No. 4, pp. 1070–1079, 2014.
- [27] H. Geramifar, M. Shahabi, T. Barforoshi, Coordination of energy storage systems and DR resources for optimal scheduling of microgrids under uncertainties, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 11, No. 2, pp. 378-388, 2017.
- [28] S. Moazeni, W. B. Powell, A. H. Hajimiragha, Mean-Conditional Value-at-Risk Optimal Energy Storage Operation in the Presence of Transaction Costs, *IEEE Transaction On Power Systems*, Vol. 30, No. 3, pp.1222- 1232, 2014.
- [29] [Online], Available: <http://ercot.com/mktinfo/prices>. [Accessed 9 September 2019].
- constrained offering strategy of a wind power producer considering demand side resources, *International Journal Of Electrical Power and Energy Systems* 104, Vol. 7, No. 13, pp. 562-574, 2019.
- [19] A.K. Fard, T.Niknam, M.F. Firuzabad, Stochastic reconfiguration and optimal coordination of V2G plug-in electric vehicles considering correlated wind power generation, *IEEE Transactions on sustainable energy*, Vol. 6, No. 3, pp. 822-830, 2015.
- [20] S.M. Ezzati, G.R. Yousefi, M.M. Pedram, Security-constrained unit commitment considering wind farms, 1st IEEE International energy conference, Bahrain, 2010.
- [21] N. S. Sains, I. Al-Anbagi, Optimal charging and discharging for EVs in a V2G participation under critical peak conditions, *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 8, No. 2, pp. 136-143, 2018.
- [22] X. Bai, W. Qiao, Robust optimization for bidirectional dispatch coordination of large-Scale V2G, *IEEE Transactions on smart grid*, Vol. 6, No. 4, pp. 1944-1954, 2015.
- [23] S. Vachirasricirikul, I. Nagamroo, Robust LFC in a Smart Grid With Wind Power Penetration by Coordinated V2G Control and Frequency Controller, *IEEE Transactions On Smart Grid*, Vol. 5, No. 1, pp. 371-380, 2014.

¹ Vehicle to grid

² Mixed Integer Linear Programming

³ Autoregressive Moving Average Model

⁴ Kantorovich distance matrix

⁵ Conditional Value at Risk

⁶ Gams

⁷ Particle Swarm Optimization

⁸ Proportional Integral

⁹ State-of-Charge

¹⁰ Robust Optimization

¹¹ Mean

¹² Standard Deviation

¹³ Value at Risk

¹⁴ State of charge

¹⁵ Electric Reliability Council of Texas

¹⁶ Radiation

