Quarterly Journal of Defense Technology Engineering, Imam Ali University
Autumn 2024, Vol. 39

Original Research

Planning and supply of electrical energy using renewable resources, taking into account energy storage in non-operating defense

Reza Sepahvand[1 *]

[1] Faculty Member of Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering and Flight, Imam Ali University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Received: 2024.08.21
Accepted: 2024.09.01
Published: 2024.09.13

Keyword:
Zero-Energy Buildings
EV Charge Station
Multi-Object optimization
Augmented Epsilon Constraint Method

***Corresponding Author:**
Reza Sepahvand
Email:
reza_sepahvand@yahoo.com

ABSTRACT

Zero energy buildings are one of the current topics in the field of energy systems. These buildings are divided into different types from the point of view of providing the required power. In this article, a building that is able to provide its own energy without connecting to the grid. Considering the importance of non-active defense, planning and using zero energy buildings can play a significant role in complying with the principles of non-active defense. The buildings can be used in important political organizations and bodies of the country and in the headquarters of the country's armed forces in times of crisis. The calculations have been done in such a way that it has the ability to exchange power with the network. In order to diversify and increase reliability, a range of renewable and non-renewable energies have been used. In order to carry out a detailed planning regarding the energy supply of the considered loads, uncertainty regarding wind, load and solar energy has been considered. Uncertainty of the load using the Monte Carlo algorithm, uncertainty of the wind using the Weibel function and uncertainty of the sun using the beta function have been taken into account. Finally, using the augmented epsilon constraint method, the constraints and objective functions are considered and the Pareto front solutions will be presented. The objective functions also include minimizing the cost of energy supply and pollutant production. In the simulation results, four scenarios are also presented, which show that the sources have a good ability to supply the load in different conditions.

فصل نامه مهندسی فناوری‌های دفاعی دانشگاه افسری امام علی (ع)

پاییز ۱۴۰۳ ، دوره ۳۹

مقاله پژوهشی

برنامه‌ریزی و تأمین انرژی برق با استفاده از منابع تجدید پذیر با در نظر گرفتن ذخیره ساز انرژی در پدافند غیر عامل

رضا سپهوند[1*]

[1] استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه افسری امام علی(ع)، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۱

انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

کلید واژگان:

ساختمان انرژی صفر

ایستگاه شارژ خودروهای برقی

بهینه سازی چند هدفه

روش محدودیت اپسیلون تقویت

[*]نویسنده مسئول

رضا سپهوند

پست الکترونیکی:

reza_sepahvand@yahoo.com

چکیده

ساختمان‌های انرژی صفر یکی از موضوعات به‌روز در حوزه‌ی سیستم‌های انرژی هستند. این ساختمان‌ها از منظر تأمین توان مورد نیاز به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. در این مقاله، یک ساختمان که قادر است انرژی خود را بدون اتصال به شبکه تأمین کند.با توجه به امر مهم پدافند غیر عامل برنامه ریزی و استفاده از ساختمان های انرژی صفر می تواند نقش بسزایی در رعایت اصول پدافند غیر عامل داشته باشد از این ساختمان ها می توان در سازمان ها و ارگان‌های مهم سیاسی کشور و در ستاد های فرماندهی نیروهای مسلح کشور در زمان بحران استفاده نمود. محاسبات به گونه‌ای انجام شده است که قابلیت تبادل توان با شبکه را نیز داشته باشد. به جهت تنوع بخشی و افزایش قابلیت اطمینان، از طیفی از انرژی‌های تجدیدپذیر و ناپذیر استفاده شده است. به جهت انجام یک برنامه‌ریزی دقیق در خصوص تأمین انرژی بارهای در نظر گرفته شده، عدم قطعیت در خصوص باد، بار و انرژی خورشیدی در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت بار با استفاده از الگوریتم مونت کارلو، عدم قطعیت باد با استفاده از تابع ویبل و عدم قطعیت خورشید با استفاده از تابع بتا لحاظ شده است. در نهایت، با استفاده از روش قید اپسیلون تقویت شده، قیود و توابع هدف در نظر گرفته می‌شوند و جواب‌های جبهه‌ی پارتو ارائه خواهند شد. توابع هدف نیز شامل کمینه‌کردن هزینه‌ی تأمین انرژی و تولید آلاینده‌هاست. در نتایج شبیه‌سازی نیز چهار سناریو ارائه شده است که نشان می‌دهند که منابع قابلیت خوبی برای تأمین بار در شرایط مختلف دارند.

مقدمه

تأمین توان مورد تقاضا در شبکه‌های برق همیشه یکی از چالش‌های اصلی در حوزه‌ی مهندسی برق بوده است. چنین چالشی باعث شده است تا در سال‌های اخیر، پاسخ به تقاضای ایجاد شده توسط مصرف‌کنندگان بار الکتریکی مطابق روش‌های جدیدی ارائه شود. طراحی ساختمان‌های انرژی صفر یکی از انواع این پاسخ‌ها است. این ساختمان‌ها می‌توانند با شبکه تبادل داشته باشند یا نداشته باشند. اهمیت مطرح‌کردن بحث ساختمان به‌این‌علت است که مطابق آمار اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده آمریکا [۱]، بیش از ۴۰ درصد از انرژی مصرفی در این کشور به ساختمان‌ها اختصاص دارد. در این گزارش آورده شده است که هرگونه تغییر مثبت در جهت کاهش مصرف انرژی در این اماکن، تأثیرات مثبت شگرفی در کل شبکه برق و توسعه آن خواهد داشت و دولت باید با استفاده از ابزارهایی چون بسته‌های مشوق، سعی در کاهش تقاضای بار به هر نوعی (بهینه‌سازی تجهیزات مصرف‌کننده یا تأمین بخشی از بار توسط آن‌ها) داشته باشد [۲]. موضوع مهم بعدی، بحث آلودگی هوا توسط تأمین انرژی به وسیله‌ی منابع فسیلی است. در مرجع [۳]، عنوان شده است که تأمین انرژی ساختمان عامل انتشار ۳۸٪ از گاز CO_2، ۵۲٪ از گاز SO_2 و ۲۰٪ از گاز NO_x به اتمسفر است که باتوجه‌به مواردی چون گرمایش جهانی به علت افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، تغییرات اقلیم و ... چنین اعدادی به‌هیچ‌وجه قابل‌توجیه نیستند. با درنظرداشتن چنین مواردی، در این مقاله برنامه‌ریزی یک ساختمان انرژی صفر با استفاده از ایستگاه شارژ دوطرفه‌ی خودروهای برقی و با در نظر گرفتن پروفیل بار ساختمان به‌صورت جامع ارائه می‌شود. استفاده از خودروهای برقی در سال‌های اخیر شتاب گرفته است و پیش‌بینی می‌شود در آینده‌ای نزدیک، حضور آن‌ها جزء نیازهای اصلی زندگی بشر باشد.

در مرجع [۴]، سیستم‌های تولید ترکیبی راه چاره‌ای برای کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی روش‌های رایج تأمین انرژی معرفی شده است و استفاده از این نوع سیستم در درازمدت را عاملی در جهت صرفه‌جویی در هزینه و افزایش قابلیت اطمینان شبکه دانسته است. در این سیستم از توربین بادی، ماژول‌های PV و باتری به‌عنوان ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده است. سناریوهای متفاوتی در این مرجع چون درنظرگرفتن حالت اتصال به شبکه بدون هرگونه عدم‌قطعیت، اتصال به شبکه با درنظرگرفتن ایجاد خطا در تجهیزات شبکه و عدم‌قطعیت در تولید منابعی چون ماژول PV و باد به علت پیش‌بینی‌ناپذیر بودن سرعت باد و شدت تابش نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، عدم‌قطعیت در بار مصرفی و درنظرگرفتن بار متغیر به‌صورت تصادفی نیز از موارد بررسی شده در این مرجع است. مرجع [۵]، یک ساختمان صفر انرژی با منبع انرژی PV و درنظرگرفتن سیستم ذخیره‌ساز را معرفی کرده است که ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز در آن در نظر گرفته شده است. مطابق گفتهٔ نویسندگان، هدف از این پژوهش برقراری هماهنگی میان سیستم ذخیره‌ساز انرژی، منبع PV و

ایستگاه شارژ خودرو برقی به‌منظور کاهش پیک‌بار و تغذیه‌ی بارهای محلی عنوان شده است. در مرجع [۶] یک ساختمان انرژی خالص صفر که تبادل انرژی آن با شبکه در طول سال صفر است، در نظر گرفته شده است. این مرجع یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها را عدم وجود تطابق زمانی میان پیک مصرف انرژی و پیک تولید برق توسط منبع PV عنوان کرده است. به همین جهت یک دیزل‌ژنراتور جهت جبران انرژی مصرفی ارائه شده است. مرجع [۷] به بررسی امکان ایجاد ایستگاه شارژ سریع خودروهای برقی به‌منظور کاهش فشار بر شبکه و کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای با تولید انرژی از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر پرداخته است. این مرجع یک سیستم بدون واسطه‌ی مبدل‌های الکترونیک قدرت میان منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم مدیریت ذخیره‌سازهای انرژی را پیشنهاد داده است. چنین سیستمی علاوه بر اختصاص انرژی به مصرف‌کننده‌های متفاوت مانند ایستگاه شارژ خودروهای برقی و اجزای DC موجود در میکروگرید، به مدیریت تبادل انرژی با شبکه نیز می‌پردازد. در نهایت، این مرجع مدعی شده است که به‌کارگیری چنین سیستمی باعث افزایش دوام عمر باتری‌های خودروهای برقی می‌شود. مرجع [۸] به بررسی نسبتاً جامعی در مورد بارها و منابع یک ساختمان انرژی صفر می‌پردازد. در این مرجع عنوان شده است که بدون ایجاد تغییر در ساختار یا سخت‌افزار یک ساختمان می‌توان بین ۲۰ تا ۳۰٪ بار مصرفی آن را کاهش داد. این مرجع نکته‌ی کلیدی بهینه‌سازی را هماهنگی میان منابع تولیدکننده‌ی انرژی و بارهای مصرفی می‌داند. مرجع [۹] به بررسی یک ساختمان تجاری انرژی صفر در سانفرانسیسکو در ایالات متحده‌ی امریکا پرداخته است. نویسنده معتقد است که مطالعات ریزشبکه[1] در مقیاس این نوع ساختمان‌ها بسیار مفید و کاربردی است. همچنین در این پژوهش سعی بر اثبات اهمیت وجود منابع گرمایشی و سرمایشی در ساختمان توسط چیلر و CHP شده است. نویسندگان در مرجع [۱۰] بر طراحی و درنظرگرفتن مقدار بهینه‌ی منبع تولید باد و ذخیره‌ساز (باتری) تمرکز کرده‌اند. در این مرجع مطالعاتی در حوزه‌ی هزینه‌های انرژی نیز انجام شده است و سه عامل هزینه‌ی قبض پرداختی، سرعت باد و مصرف بار الکتریکی به‌عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شده‌اند. مرجع [۱۱] سیستم جامعی از تولیدکننده‌های انرژی با تمرکز به تقسیم این تولیدکننده‌ها به دودسته‌ی الکتریکی و حرارتی دارد. منابع تولیدکننده‌ی انرژی در این مرجع شامل PV، باد و میکروتوربین و بویلر تغذیه شونده با گاز طبیعی است. همچنین، در این مرجع آورده شده است که به‌کارگیری میکروتوربین اثر به سزایی در کاهش عدم‌قطعیت دارد. در مرجع [۱۲] مجموعه‌ای مسکونی در نظر گرفته شده است که متصل به شبکهٔ برق هستند. تمام این منازل دارای منابع تولید تجدیدپذیر و ایستگاه شارژ خودروهای برقی هستند. هدف در این پژوهش کاهش هزینه‌ی اجرای چنین مجموعه‌ای است. در این مقاله جهت حل مشکلات عدم‌قطعیت، عدم توازن تولید و مصرف در

[1] Microgrid

ساختمان‌های صفر انرژی و با رویکرد در نظر گرفتن ایستگاه شارژ خودروهای برقی، سرفصل‌ها به ترتیب مقابل هستند: در بخش ۲، پروفیل دقیق بار ساختمان ارائه خواهد شد. بخش سوم به معرفی مسئله‌ی چندهدفه و روش حل آن می‌پردازد. بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی را نشان خواهد داد و در بخش آخر نتیجه‌گیری انجام خواهد شد.

۲- پروفیل بار

تعیین بار مصرفی ساختمان موضوع بااهمیتی است و میزان دقت انجام محاسبات در آن از اهمیت برخوردار است؛ چراکه این محاسبات به‌نوعی مبنای تعیین و تخمین منابع موردنیاز تأمین انرژی خواهد بود. باتوجه‌به تغییرات گسترده‌ی میزان بار مصرفی در زمان‌های متفاوت بار پایه، روزانه و فصلی به دست آورده خواهد شد. باتوجه‌به اینکه قرار بر تعیین یک پروفیل بار دقیق است، در این مقاله، نوع کاربری ساختمان اداری و محاسبات در راستای در نظر گرفتن ۱۰ طبقه با متراژ ۳۰۰۰ مترمربع در نظر گرفته خواهد شد. برای فراهم‌کردن مقدمات تأمین نیروی برق هر طرح، لازم است حداکثر درخواست (دیماند) انرژی الکتریکی توسط آن طرح را برآورد کرد. روش صحیح تخمین حداکثر دیماند بر اساس محاسبه توان کل نصب شده و اعمال ضرایب هم‌زمانی مناسب استوار است [۱۳].

۲-۱- انواع بارهای مصرفی

بارهای مصرفی به دو دسته‌ی روزانه و فصلی تقسیم می‌شوند. به‌عنوان نمونه، نیازی به درنظرگرفتن سیستم گرمایش در فصل گرما نیست؛ اما سیستم روشنایی همواره و در تمام فصول مورداستفاده قرار می‌گیرد. بارهای روزانه نیز بارهایی هستند خود به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول تجهیزاتی هستند که در طی ساعات خاصی از روز به‌عنوان مصرف‌کننده در نظر گرفته می‌شوند. به طور مثال، در یک فضای اداری، برخی از لامپ‌ها، رایانه‌ها و ... به‌صورت دائمی روشن نیستند و صرفاً در ساعات مشخصی از روز نیاز به تأمین انرژی برای آن‌ها است. دسته‌ی دوم تجهیزاتی هستند که خاموش نمودن آن‌ها در طی شبانه‌روز مجاز نیست. به‌عنوان‌مثال، خاموش‌کردن دوربین‌های مداربسته یا یخچال ممکن نیست. موضوع مهم بعدی که در مورد مصرف بارهای الکتریکی موجود در ساختمان وجود دارد، در نظر گرفتن ضرایبی چون هم‌زمانی، توسعه و ... است. جدول ۱، برخی از بارهای در نظر گرفته شده در ساختمان به همراه میزان مصرف آن‌ها را نشان می‌دهد. میزان مصارف باتوجه‌به تعداد خاصی که در ساختمان موردنظر به کار گرفته می‌شود، در نظر گرفته شده است. (حاصل‌ضرب تعداد در توان نامی)

جدول (۱): انواع بارهای مصرفی

نوع بار	مصرف (کیلووات)	نوع بار	مصرف (کیلووات)
روشنایی	۳۰	سیستم مخابراتی، اتاق سرور و ...	۶۵
دوربین مداربسته	۲	دستگاه فتوکپی	۱۵
یخچال	۴۰۰۰ کیلوات ساعت در سال	چای‌ساز	۴۴
کامپیوتر	۵۰	آسانسور	۲۰۰ کیلووات ساعت در روز
پمپ آب	۳	پرینتر و فکس	۵
تلویزیون	۱,۵	خشک‌کن برقی دست	۱,۸
ماکروویو	۱۸	ماشین لباسشویی	۱۰
یوپی‌اس	۶	انواع فن	۲
جاروبرقی صنعتی	۲۰	آبسردکن	۱۲
ماشین ظرفشویی	۲۴	سیستم خنک کننده	۱۵۰
سایر	۱۵	جمع کل	۴۸۶,۲۹

تا اینجا اعداد به‌صورت لحظه‌ای و پیک‌بار محاسبه شدند. درنظرگرفتن جمع این اعداد برای درنظرگرفتن بدترین حالت ضروری است؛ اما، در مباحث طراحی انواع بارهای بالا به‌صورت روزانه و فصلی نیز در نظر گرفته می‌شوند تا میزان دقیق نیاز به دست آید. به این منظور، ضریب توسعه به میزان ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است تا اگر در آینده باری به ساختمان اضافه شد، جهت تأمین انرژی لازم برای آن مشکلی به وجود نیاید.

۲-۲ بارهای روزانه و فصلی

در یک ساختمان اداری در کنار برخی از بارها که هرازگاهی جزئی از دیماند هستند، مانند پیچ‌گوشتی برقی، انرژی برخی از بارها به‌صورت روتین و در ساعات مشخصی از روز باید تأمین شود.

به‌عنوان‌مثال، در یک دفتر اداری برای تأمین نور موردنیاز کارکنان، همواره نیاز به لامپ و چراغ است. در [۱] عنوان شده است که روشنایی می‌تواند تا بیش از ۲۰ درصد از میزان انرژی الکتریکی مصرفی یک ساختمان را به خود اختصاص دهد. در مورد فصل‌های متفاوت نیز می‌توان گفت که مصرف مربوط به روشنایی در پاییز و زمستان بیش از بهار و تابستان است چرا که روز کوتاه‌تر است. همچنین، برخی موارد چون سرمایش و گرمایش در فصول تابستان و زمستان متغیر است. با در نظر گرفتن تمام داده‌های فوق، جدول ۲ نشان‌دهنده‌ی مصرف بار مورد تقاضای ساختمان پس از در نظر گرفتن انواع موارد مصارف در زمان‌های متفاوت طی یک‌سال به دست می‌آید. در بخش چهارم نیز پروفیل بار مورد تقاضای ساختمان رسم خواهد شد.

جدول (۲): مصرف بار در پیک و در بازه‌ی زمانی روزانه، هفتگی و فصلی (کیلووات‌ساعت)

بازه زمانی / نوع مصرف	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
پیک‌بار	۱۷۷۲,۱۲	۲۵۴۶,۱۲	۱۵۷۴,۱۲	۱۶۴۶,۱۲
روزهای کاری	۴۹۸۸,۰۸	۶۷۲۸,۹۸	۴۶۰۶,۷۲	۴۷۳۲,۶
روزهای تعطیل	۲۸۶۰,۹۸	۲۸۶۰,۹۸	۲۸۶۰,۹۸	۲۸۶۰,۹۸
هفتگی	۳۲۷۸۹,۴۶	۴۳۲۳۴,۸۶	۳۰۵۰۱,۳	۳۱۲۵۶,۵۸
فصلی	۴۱۴۹۶۸,۱۴	۵۵۶۱۷۱,۱۴	۳۸۶۶۷۲,۹۶	۳۸۵۶۴۰,۶۲
سالانه	۱،۷۴۳،۴۵۲,۸۶ کیلووات‌ساعت			

۳- منابع به کار گرفته شده در ساختمان انرژی صفر و مدل آن‌ها

به جهت تأمین انرژی ساختمان موردنظر لازم است تا منابع آن نیز در نظر گرفته شود. باتوجه‌به یکی از اهداف مسئله که موضوع کمینه‌کردن آلودگی محیط‌زیست است، لازم است تا منابع تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های بادی و خورشیدی به هر ترتیبی در نظر گرفته شوند. بدیهی است که چنین نیروگاه‌هایی عدم‌قطعیت دارند و این مشکل می‌تواند با بهینه در نظر گرفتن منابع سوخت فسیلی مرتفع گردد.

۳-۱ مدل نیروگاه بادی

اولین منبع در نظر گرفته شده برای ساختمان، توربین بادی است. تولید انرژی بادی توسط توربین بادی کاملاً به اثر متقابل باد و روتور توربین بادی بستگی دارد [۱۴]؛ لذا، میانگین توان خروجی به میانگین سرعت باد بستگی دارد؛ بنابراین، در این پروژه تنها حالت پایدار مورد اهمیت است و می‌توان از تلاطماتی که دراین‌بین برای توربین اتفاق می‌افتد صرف‌نظر کرد. تحلیل آیرودینامیکی توربین بادی توسط Betz [۱۵] و Glauert [۱۶] و توان در دسترس توسط باد مطابق رابطه‌ی ۱ است.

$$P_{WT}=\begin{cases}0 & \forall t: V^{cutin}\geq Vt \text{ and } V^{cutout}\leq Vt\\ 0.5.\rho.a.\eta^{W}.\min(V_t,V^{nom})^3 & \forall t: V^{cutin}\geq Vt\geq V^{cutout}\end{cases} \quad (۱)$$

که در رابطه‌ی بالا، P_{WT} توان توربین بادی (kW)، $V_{cut\text{-}in}$ حداقل سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه (m/s)، $V_{cut\text{-}out}$ حداکثر سرعت باد برحسب متر بر ثانیه (m/s)، V_t سرعت باد در زمان t بر حسب متر بر ثانیه (m/s)، ρ چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب (kg/m^3)، a مساحت پره ژنراتور بادی بر حسب مترمربع (m^2)، η_W ضریب توان ژنراتور بادی و V_{nom} سرعت باد نامی برحسب متر بر ثانیه (m/s) است.

۳-۲ مدل نیروگاه خورشیدی

دومین منبع، انرژی حاصل از ماژول‌های خورشیدی یا همان PV است. توان خروجی PV، $P_{PV(t)}$ بر اساس درجه‌ی حرارت ماژول و میزان تابش خورشید است.

$$P_{PV}(t)=\left(\left[P_{PV,STC}\times\frac{G(t)}{G_{ref}}\times\left(1-\gamma\times\left(T(t)-T_0\right)\right)\right]\times N_{PVs}\times N_{PVp}\right) \quad (۲)$$

دراین‌رابطه، $N_{PV,s}$ تعداد ماژول‌های سری در یک آرایه، $N_{PV,p}$ تعداد ماژول‌های موازی در یک آرایه، T_0 دمای مرجع سلول در شرایط تست استاندارد (۲۵°C)، $T_{(t)}$ دمای سلول در لحظه‌ی t، $G_{(t)}$ میزان تابش در لحظه‌ی t، $P_{PV,STC}$ توان خروجی ماژول PV در شرایط تست استاندارد و γ ضریب حرارت توان است.

۳-۳ مدل منابع ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی

باتوجه‌به نیاز به ذخیره‌سازی و در راستای تنوع‌بخشی به منابع تأمین‌کننده‌ی انرژی، ذخیره‌سازی در دو نوع الکتریکی و حرارتی صورت می‌پذیرد. معادلات ۳ تا ۱۰ مدل و محدودیت‌های ذخیره‌ساز استفاده شده در مدل را نمایش می‌دهد.

$$P_{ES}\cdot(t)=E_S(t)-E_S(t-1) \qquad t=1,2,...,T \tag{۳}$$

دراین‌رابطه، $P_{ES}(t)$ توان ذخیره‌سازی الکتریکی در زمان t بر حسب کیلووات، $Es(t)$ انرژی ذخیره‌سازی الکتریکی در زمان t بر حسب کیلووات‌ساعت و t زمان بر حسب ساعت است.

$$E_S^{\min}\le E_S(t)\le E_S^{\max} \tag{۴}$$

در رابطه‌ی (۴)، E_s^{max} و E_s^{min} به ترتیب حداکثر و حداقل انرژی ذخیره‌سازی الکتریکی هستند. این محدودیت بیان می‌کند که انرژی ذخیره‌ساز همواره در یک بازه محدود شده است.

$$\begin{cases} E_S^{\min}-E_S(0)\le\sum_{k=1}^{t}P_{ES}(k)\le E_S^{\max}-E_S(0) \\ \left(\forall t=1,2,...,T\right) \end{cases} \tag{۵}$$

دراین‌رابطه، تغییرات انرژی باتری در یک دوره تناوب زمانی بیان شده است.

$$E_S(0)=E_S(T) \tag{۶}$$

در رابطه‌ی (۶) بیان شده است که انرژی ذخیره‌ساز الکتریکی در ابتدا و انتهای بازه باید حتماً برابر باشد. مدل سیستم ذخیره‌ساز حرارتی مطابق روابط (۷) تا (۱۰) است.

$$P_{TS}(t)=TE_S(t)-TE_S(t-1) \quad t=1,2,...,T \tag{۷}$$

دراین‌رابطه $P_{ES}(t)$ توان ذخیره‌سازی الکتریکی در زمان t (kW) و $TE_s(t)$ انرژی ذخیره‌سازی حرارتی در زمان t (kWh_{heat}) است.

$$TE_S^{\min}\le TE_s(t)\le TE_S^{\max} \tag{۸}$$

که در رابطه‌ی بالا TE_S^{max} حداکثر انرژی ذخیره‌سازی حرارتی (kWh_{heat}) و TE_S^{min} حداقل انرژی ذخیره‌سازی حرارتی (kW_{heat}) است.

$$\begin{cases} TE_S^{\min} - TE_S(0) \le \sum_{k=1}^{t} P_{TS}(k) \le TE_S^{\max} - TE_S(0) \\ (\forall t = 1,2,...,T) \end{cases} \quad (۹)$$

$$TE_S(0) = TE_S(T) \quad (۱۰)$$

چند قید لحاظ شده به این صورت است که مقدار ابتدایی و نهایی انرژی ذخیره‌شده در باطری‌ها باید یکسان باشد، شارژ و دشارژ باطری‌ها دارای محدودیت تعریف‌شده است و همچنین یک حداقل و حداکثر ظرفیت تعریف‌شده برای باطری‌ها وجود دارد. لازم به ذکر است عدم‌قطعیت بار، باد و خورشید به ترتیب با استفاده از الگوریتم مونت‌کارلو، تابع توزیع ویبل و بتا مدل شده است.

همچنین در این مقاله جهت افزایش قابلیت اطمینان و افزایش امنیت شبکه به لحاظ تأمین انرژی از بویلر، تولید هم‌زمان گرما و برق (CHP) و میکروتوربین نیز استفاده می‌شود که این منابع در توابع هزینه و آلودگی محیط‌زیست اعمال خواهند شد.

۴- توابع هدف

دو تابع هدف هزینه و میزان انتشار آلودگی برای مدل تعریف‌شده است که مقدار آن‌ها در قالب یک مدل دو هدفه بهینه و حل خواهد شد.

۴-۱ تابع هزینه

یکی از مهم‌ترین فاکتورها برای یک سیستم، در نظر گرفتن انواع و اقسام هزینه‌های اجرای تشکیل‌دهنده است. این هزینه‌ها شامل هزینه احداث و راه‌اندازی، سرویس و نگه‌داری یا به‌طورکلی هزینه‌های پس از بهره‌برداری می‌شود. باتوجه‌به موارد گفته شده، هزینه کل سیستم موردنظر به شرح زیر است:

$$\begin{cases} F(\mathrm{Cost}) = \sum_{t=1}^{T} (C_{CHP}(t) + C_{Wind}(t) + C_{Boiler}(t) + C_{PV}(t) + \\ C_{Buy}(t) - C_{Sell}(t) + C_{ES}(t) + C_{TS}(t) + C_{MT}(t)) \end{cases} \quad (۱۱)$$

که در آن $F(Cost)$ هزینه‌ی کل ($)، $C_{CHP}(t)$ هزینه کل CHP در زمان t ($)، $C_{wind}(t)$ هزینه کل توربین بادی در زمان t ($)، $C_{boiler}(t)$ هزینه کل بویلر در زمان t ($)، $C_{pv}(t)$ هزینه کل PV در زمان t ($)، $C_{Buy}(t)$ هزینه خرید در زمان t ($)، $C_{Sell}(t)$ هزینه فروش در زمان t ($)، $C_{ES}(t)$ هزینه کل سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی در زمان t ($)، $C_{TS}(t)$ هزینه کل سیستم ذخیره‌ساز حرارتی در زمان

t ($)، $C_{MT}(t)$ هزینه‌ی کل میکروتوربین در زمان t ($) است.

$$C_{CHP}(t)=\left(\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{C_{Fuel}.P_{CHP}(t).\theta}{\eta_{CHP}}+C_{OP-CHP}.P_{CHP}(t).\theta\right)+C_{M-CHP}\right) \quad (۱۲)$$

دراین‌رابطه C_{Fuel} هزینه سوخت ($)، $P_{CHP}(t)$ توان CHP در زمان t (kW)، η_{CHP} بازده الکتریکی ژنراتور CHP، $C_{M\text{-}CHP}$ هزینه تعمیر و نگه‌داری CHP ($)، $C_{OP\text{-}CHP}$ هزینه‌ی بهره‌برداری CHP ($/kWh) و θ فاصله زمانی است.

$$C_{Wind}(t)=\sum_{t=1}^{T}C_{OP-WT}(t).P_{WT}(t).\theta+C_{CONS-WT} \quad (۱۳)$$

که در آن $C_{OP\text{-}WT}$ هزینه بهره‌برداری توربین بادی ($/kWh)، $P_{WT}(t)$ توان توربین بادی در زمان t (kW) و $C_{CONS\text{-}WT}$ هزینه ثابت توربین بادی ($) است.

$$C_{PV}(t)=\sum_{t=1}^{T}C_{OP-PV}(t).P_{PV}(t).\theta+C_{CONS-PV} \quad (۱۴)$$

$C_{OP\text{-}PV}$ هزینه بهره‌برداری PV ($/kWh)، $P_{PV}(t)$ توان PV در زمان t (kW) و $C_{CONS\text{-}PV}$ هزینه ثابت PV ($) است.

$$C_{Boiler}(t)=\left(\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{C_{Fuel}.P_{Boiler}(t).\theta}{\eta_{Boiler}}+C_{OP-Boiler}.P_{Boiler}(t).\theta\right)+C_{M-Boiler}\right) \quad (۱۵)$$

که دراین‌رابطه $C_{boiler}(t)$ هزینه کل بویلر در زمان t ($)، $P_{Boiler}(t)$ توان بویلر در زمان t (kW_{heat})، $C_{OP\text{-}Boiler}$ هزینه بهره‌برداری بویلر ($/kWh) و $C_{M\text{-}Boiler}$ هزینه‌ی تعمیر و نگهداری بویلر ($) است.

$$C_{MT}(t)=\left(\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{C_{Fuel}.P_{MT}(t).\theta}{\eta_{MT}}+C_{OP-MT}.P_{MT}(t).\theta\right)+C_{M-MT}\right) \quad (۱۶)$$

در رابطه‌ی (۱۶)، $P_{MT}(t)$ توان MT در زمان t (kW)، $C_{OP\text{-}MT}$ هزینه‌ی بهره‌برداری MT ($/kWh)، $C_{M\text{-}MT}$ هزینه تعمیر و نگهداری ($) و η_{MT} بازده الکتریکی میکروتوربین است.

هزینه‌های تولید انرژی و نگه‌داری CHP، WT، PV، دیگ بخار و MT به‌صورت قسمت اول هزینه سوخت و قسمت دوم هزینه‌های عملیاتی و نگهداری در معادلات بالا نمایش داده شده‌اند. ترم اول هزینه تولید دیگ بخار و میکروتوربین، ترم دوم و سوم هزینه‌های عملیاتی و نگهداری در معادله (۱۶) نشان‌داده‌شده است. هزینه نگه‌داری و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در معادلات (۱۳) و (۱۴) نشان‌داده‌شده‌اند. معادلات (۱۷) و (۱۸) محدودیت‌های خریدوفروش انرژی را نشان می‌دهند و معادلات (۱۹) و (۲۰) هزینه نگه‌داری باطری‌های الکتریکی و حرارتی هستند.

$$C_{Buy}(t) = \sum_{t=1}^{T} C_{Buy} . P_{Buy} . \theta \qquad (۱۷)$$

دراین‌رابطه $C_{Buy}(t)$ هزینه خرید در زمان t ($)، C_{Buy} هزینه خرید ($) و $P_{Buy}(t)$ توان خریداری شده در زمان t (kW) است.

$$C_{Sell}(t) = \sum_{t=1}^{T} C_{Sell} . P_{Sell} . \theta \qquad (۱۸)$$

دراین‌رابطه $C_{Sell}(t)$ هزینه فروش در زمان t ($)، C_{Sell} هزینه فروش ($) و $P_{Sell}(t)$ توان فروخته شده در زمان t (kW) است.

$$C_{ES}(t) = \sum_{t=1}^{T} C_{OP-ES} . P_{ES} . \theta + C_{M-ES} \qquad (۱۹)$$

$$C_{TS}(t) = \sum_{t=1}^{T} C_{OP-TS} . P_{TS} . \theta + C_{M-TS} \qquad (۲۰)$$

در این روابط $C_{ES}(t)$ هزینه‌ی کل ES در زمان t ($)، $C_{M\text{-}ES}$ هزینه‌ی تعمیر و نگهداری ES ($)، $C_{OP\text{-}ES}$ هزینه بهره‌برداری ES ($/kWh)، $P_{ES}(t)$ توان ذخیره‌سازی الکتریکی در زمان t (kW)، $C_{TS}(t)$ هزینه کل TS در زمان t ($)، $C_{OP\text{-}TS}$ هزینه بهره‌برداری TS ($/kWh)، $P_{TS}(t)$ توان ذخیره‌سازی حرارتی در زمان t (kW_{heat}) و $C_{M\text{-}TS}$ هزینه تعمیرونگه‌داری TS ($) است.

۲-۴ تابع آلودگی محیط‌زیست

کاهش آلودگی هوا و محیط‌زیست یکی از اهداف این پـژوهش اسـت. در همـین راسـتا، تـلاش بـر کاهش گازهای تولید شده توسط منابع آلوده‌کننده‌ی مورداستفاده در سیستم بـوده اسـت. تـابع هـدف آلودگی و اجزای آن در ادامه آمده‌اند.

$$\begin{cases} F(Emission) = \sum_{t=1}^{T} (EM_{CHP}(t) + EM_{MT}(t) + EM_{MG}(t) + EM_{Boiler}(t)) \end{cases} \quad (۲۱)$$

دراین‌رابطه $F(Emission)$ آلودگی کل (kg)، EM_{CHP} انتشار آلودگی CHP (kg)، EM_{MT} آلودگی MT (kg)، EM_{Boiler} آلودگی بویلر (kg) و EM_{MG} انتشار شبکه‌ی اصلی (kg) است.

$$EM_{CHP}(t) = \sum_{t=1}^{T} EM_{CHP}.EF_{CHP}.\theta \quad (۲۲)$$

$$EM_{Boiler}(t) = \sum_{t=1}^{T} EM_{Boiler}.EF_{Boiler}.\theta \quad (۲۳)$$

$$EM_{MT}(t) = \sum_{t=1}^{T} EM_{MT}.EF_{MT}.\theta \quad (۲۴)$$

$$EM_{MG}(t) = \sum_{t=1}^{T} EM_{MG}.EF_{MG}.\theta \quad (۲۵)$$

که در این روابط تمام پارامترهای با زیروند (t) بـه معنـی در واحـد زمـان هسـتند، EF_{CHP} فـاکتور آلودگی CHP (kg/Mwah)، EF_{MT} فاکتور آلودگی MT (kg/Mwah)، EF_{Boiler} فاکتور آلودگی بویلر (kg/Mwah) و EF_{MG} فاکتور آلودگی شبکه‌ی اصلی (kg/Mwah) است.

معادلات (۲۲) تا (۲۵) به ترتیب نشان‌دهنده آلودگی تولیدشده توسط CHP، دیگ بخار، MT و آلودگی متناظر با انرژی خریداری‌شده است. قیود حاکم بر مسئله و قیود حاکم بر اجزای تولیدی و مصرفی ساختمان ارائه‌دهنده نوع رفتار و محدودیت‌های حاکم بر آن هستند.

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{T} E_{LD}(t) = \sum_{t=1}^{T} (P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + \\ P_{CHP}(t) + P_{ES}(t) + P_{Buy}(t) - P_{sell}(t) + P^{dem}(t)) \end{cases} \quad (۲۶)$$

در ایـن معادلـه $E_{LD}(t)$ تقاضـای انـرژی الکتریکـی در زمـان t (kWh) و $P^{dem}(t)$ تقاضـای تـوان الکتریکی در زمان t (kW) است.

$$\left\{\sum_{t=1}^{T} T_{LD}(t) = \sum_{t=1}^{T} (P_{Boiler}(t) + P_{CHP}(t) TF_{CHP}(t) + P_{TS}(t))\right.$$

(۲۷)

$$P_{CHP} \le P_{CHP}^{\max}$$

(۲۸)

$$P_{Boiler} \le P_{Boiler}^{\max}$$

(۲۹)

$$P_{MT} \le P_{MT}^{\max}$$

(۳۰)

$$\begin{cases} P_{ES}(t) \Big/ \eta_D^E \le P_{E-dech}^{\max} & for\ \ dech\left(\left(P_{ES}(t) \succ 0\right)\right) \\ -\eta_C^E . P_{ES}(t) \le P_{E-ch}^{\max} & for\ \ ch\left(\left(P_{ES}(t) \prec 0\right)\right) \end{cases}$$

(۳۱)

$$\begin{cases} P_{TS}(t) \Big/ \eta_D^T \le P_{T-dech}^{\max} & for\ \ dech\left(\left(P_{TS}(t) \succ 0\right)\right) \\ -\eta_C^T . P_{TS}(t) \le P_{T-ch}^{\max} & for\ \ ch\left(\left(P_{TS}(t) \prec 0\right)\right) \end{cases}$$

(۳۲)

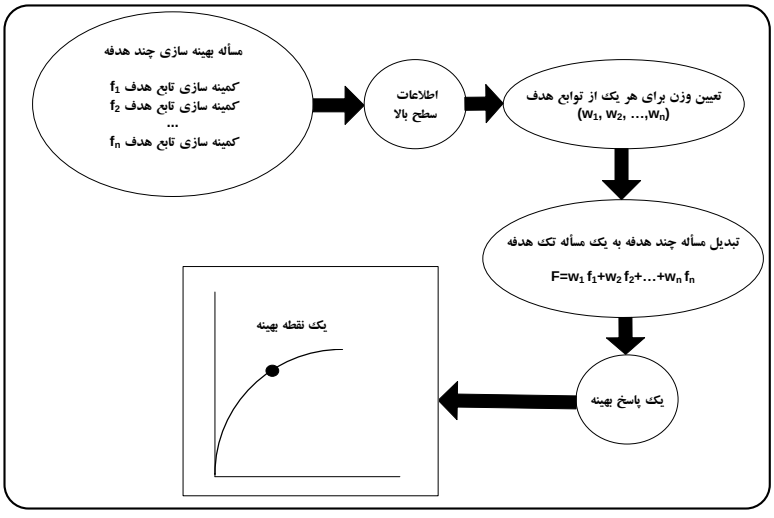
$$\left(P_{Buy}(t)\ or\ P_{Sell}(t)\right) \le P_{Line}$$

(۳۳)

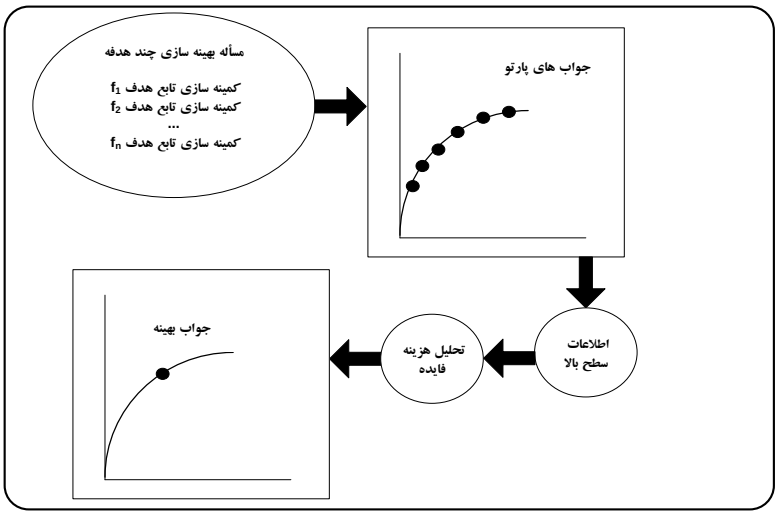
در این روابط $T_{LD}(t)$ تقاضای بار حرارتی در زمان t (kW_{heat})، $P^{max}{}_{CHP}$ حداکثر توان CHP (kW)، $P^{max}{}_{Boiler}$ حداکثر توان بویلر (kW_{heat})، $P^{max}{}_{MT}$ حداکثر توان میکروتوربین (kW)، P_{Line} حد توان انتقال خط (kW)، $\eta^{E}{}_{D}$ بازده تخلیه ذخیره‌ساز الکتریکی، $P^{max}{}_{E\text{-}dech}$ حداکثر نرخ تخلیه ذخیره‌سازی الکتریکی، $\eta^{E}{}_{C}$ بازده شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی، $P^{max}{}_{E\text{-}ch}$ حداکثر نرخ شارژ ذخیره‌سازی الکتریکی، $\eta^{T}{}_{D}$ بازده تخلیه ذخیره‌ساز حرارتی، $P^{max}{}_{T\text{-}dech}$ حداکثر نرخ تخلیه ذخیره‌سازی حرارتی، $\eta^{T}{}_{C}$ بازده شارژ ذخیره‌ساز حرارتی و $P^{max}{}_{T\text{-}ch}$ حداکثر نرخ شارژ ذخیره‌سازی حرارتی است. معادلات (۲۶) و (۲۷) تعادل قدرت و بار حرارتی هستند. تعادل بار به این معنی است که کل توان حرارتی و توان الکتریکی تولیدشده در هر بازه زمانی باید برابر با کل بار حرارتی و تقاضای بار الکتریکی باشد. (۲۸) تا (۳۰) به ترتیب نشان‌دهنده محدودیت‌های تولید CHP، دیگ بخار و میکروتوربین است. معادلات (۳۱) و (۳۲) قدرت شارژدهی-تخلیه برای محدودیت‌های باتری‌های الکتریکی و حرارتی و محدودیت‌های آن‌ها را نشان می‌دهد. قید (۳۳) محدودیت توان عبوری از خط را نشان می‌دهد.

۵- بهینه‌سازی چندهدفه

در این مقاله جهت حل مسئله چندهدفه با رویکرد پسینی به موضوع پرداخته شده است. این رویکرد نسبت به روش حل پیشینی مزایای فراوانی دارد. در روش‌های پیشینی، مطابق الگوریتم شکل (۱)، ابتدا برنامه‌ریز سیستم اهمیت هر یک از توابع هدف را باتوجه‌به اطلاعات سطح بالا تعیین و سپس با تبدیل مسئله چندهدفه به یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه به حل مسئله می‌پردازد که در این حالت امکان تحلیل هزینه - فایده امکان‌پذیر نیست. مشکل اصلی در روش‌های پیشینی این است که برنامه‌ریز سیستم ممکن است نتواند وزن‌های مناسبی برای هر یک از توابع هدف پیدا کند که در این صورت ممکن است جواب‌های به‌دست‌آمده قابل‌اطمینان نباشند. در رویکردهای پسینی، توسط اطلاعات سطح بالا جواب‌های پارتو مشخص‌شده و برنامه‌ریز سیستم این قابلیت را دارد که باتوجه‌به معیارهای خود جواب بهینه را از بین جواب‌های پارتو تعیین نماید [۱۷]. در شکل ۲ نحوه به‌دست‌آوردن جواب بهینه در رویکردهای پسینی آمده است.



شکل (۱): رویکرد پیشینی در حل مسائل چندهدفه



شکل (۲): رویکرد پسینی در حل مسائل چندهدفه

۱-۵ روش محدودیت اپسیلون

برای حل مسائل چندهدفه از روش محدودیت ε (اپسیلون) استفاده می‌شود. در این روش یکی از توابع هدف به‌عنوان هدف اصلی و سایر توابع هدف به‌عنوان محدودیت در معادله توضیح داده شده در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} &\min \quad f_1(x) \\ &\text{s.t:} f_2(x) \le \varepsilon_2, f_3(x) \le \varepsilon_3, ..., f_M(x) \le \varepsilon_M \\ &\text{other constraints} \end{aligned} \qquad (۳۴)$$

روش محدودیت ε دو مرحله دارد: ایجاد جدول پرداخت و استفاده از محدوده‌های جدول پرداخت به‌منظور اعمال روش. روش محدودیت ε چندین مزیت دارد از جمله [۱۸]:

۱. برای مسائل خطی، روش وزن‌دهی به ناحیه‌ی امکان‌پذیر اصلی پاسخ اعمال می‌شود و به یک راه‌حل گوشه‌ای (راه‌حل افراطی) منجر می‌شود، بنابراین تنها راه‌حل‌های افراطی کارآ تولید می‌شود. در مقابل، روش محدودیت ε منطقه امکان‌پذیر اصلی را تغییر می‌دهد و قادر به تولید راه‌حل‌های کارآمد غیرافراطی است. درنتیجه، در روش وزن‌دهی ممکن است تعداد زیادی اجرا وجود داشته باشند که منجر به پاسخ‌های یکسان گوشه‌ای یا افراطی شوند. از سوی دیگر، با محدودیت ε می‌توان تقریباً از هر اجرا برای تولید یک راه‌حل کارآمد متفاوت بهره‌برداری برد، بنابراین نمایش غنی‌تری از مجموعه کارآمد به دست می‌آید.

۲. روش وزن‌دهی نمی‌تواند راه‌حل‌های کارآمد پشتیبانی نشده در مسائل برنامه‌ریزی متشکل از عدد صحیح و ترکیبی چندهدفه تولید کند درحالی‌که روش محدودیت ε این مشکل را ندارد.

۳. در روش وزن‌دهی مقیاس‌بندی توابع هدف تأثیر زیادی در نتایج به‌دست‌آمده دارد؛ بنابراین، قبل از تشکیل مجموع وزنی، توابع هدف باید با یک مقیاس مشترک مرتب شوند. در روش محدودیت ε این مورد موضوعیتی ندارد.

۴. مزیت اضافی روش محدودیت ε این است که تعداد راه‌حل‌های کارآمد تولیدشده را می‌توان از طریق تنظیم تعداد نقاط شبکه در هر محدوده تابع هدف کنترل کرد.

باتوجه‌به توضیحات ذکر شده، به‌راحتی می‌توان دریافت که در روش محدودیت ε معمولی، فرایند بهینه‌سازی تنها برای یکی از توابع هدف انجام می‌شود و این در حالی است که توابع هدف دیگر به کران بالای خود می‌رسند. درواقع، روش محدودیت ε معمولی بیشتر پاسخ‌هایی را به‌صورت $f_2(x) = \varepsilon_2$ و...و $f_M(x) = \varepsilon M$ می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر در روش محدودیت ε معمولی ممکن است پاسخ‌ها ناکارآمد باشند. علاوه بر این، ممکن است برخی از جواب‌های تولید شده یکدیگر را مغلوب کنند که این موضوع از کارایی روش اپسیلون محدودیت معمولی می‌کاهد. در سال‌های اخیر روش‌های متفاوتی برای حل این مشکل پیشنهاد شده است. به‌عنوان‌مثال در [۱۸] با ایجاد دو تغییر جزئی اما مؤثر، معایب روش اپسیلون محدودیت تا حد زیادی رفع شد و یک نسخه‌ی تقویت شده یا تکامل‌یافته از آن ارائه شد.

۲-۵ روش محدودیت اپسیلون تقویت شده

روش محدودیت ε تقویت‌شده با تولید متغیرهای کمبود مثبت، قیود نابرابری توابع هدف محدود در معادله‌ی (۳۴) مرجع [۱۸] را به محدودیت‌های برابری تبدیل می‌کند. محدودیت ε تقویت شده از بهینه‌سازی در ساخت جدول پرداخت و یک تابع هدف تغییریافته برای اطمینان از تولید راه‌حل‌های بهینه پارتو (و نه بهینه‌ی ضعیف پارتو) استفاده می‌کند. علاوه بر این، خروج زودهنگام از حلقه‌هایی را نتیجه می‌دهد که پاسخ غیرممکن دارند و عملکرد الگوریتم را در مسائل چندهدفه با چندین تابع هدف بهبود می‌بخشد. اثبات موارد گفته شده در مرجع [۱۸] به‌صورت کامل آورده شده است.

یکی از مزایای روش محدودیت ε افزوده نسبت به روش وزن‌دهی در مسائل برنامه‌ریزی آمیخته عدد صحیح است که در آن راه‌حل‌های بهینه پارتو پشتیبانی نشده را می‌توان تولید کرد و امکان تغییر منطقه اصلی مهیا می‌شود؛ بنابراین مقادیر کمبود، به تابع هدف اصلی افزوده می‌شود و روش محدودیت ε تقویت‌شده به‌صورت رابطه‌ی (۳۵) نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned}&\min \quad f_1(x)+\delta\times(s_1+s_2+...,s_M)\\&\text{s.t:}f_2(x)=\varepsilon_2+s_2,f_3(x)\varepsilon_3+s_3,...,f_M(x)=\varepsilon_M+s_M\\&\text{other constraints}\end{aligned} \quad (۳۵)$$

که در آن δ یک عدد کوچک است که معمولاً بین $۱۰^{-۳}$ و $۱۰^{-۶}$ است.

۴-۲ مدل عدم‌قطعیت‌ها

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر باعث عدم‌قطعیت در سیستم خواهد شد. در شرایط جوی مختلف مانند شرایط ابری یا بارانی و همچنین در صورت پوشیده‌شدن ماژول‌های PV با برف، تولید انرژی توسط این منبع محدود خواهد شد. به همین دلیل باید بادقت به رفع این عدم‌قطعیت تا حد ممکن پرداخت. می‌توان گفت که یکی از مهم‌ترین کاربردهای منابع تولید انرژی دیگر مانند میکروتوربین و CHP ازبین‌بردن این عدم‌قطعیت‌ها است. در ادامه به مدل‌سازی انواع عدم‌قطعیت منابع موجود در ساختمان انرژی صفر پرداخته خواهد شد. مورد بعدی میزان تقاضای بار است. بارهای الکتریکی، به دلیل نامعینی در پیش‌بینی‌پذیری‌شان، با عدم‌قطعیت همراه هستند؛ بنابراین لحاظ‌کردن این عدم‌قطعیت‌ها سبب می‌شود تا طرح ارائه‌شده به نحوی پاسخ‌گوی نیاز موردنیاز در طول دوره برنامه‌ریزی باشد. واردکردن عدم‌قطعیت‌ها در برنامه‌ریزی سبب ایجاد تغییر در طرح ارائه‌شده می‌شود. به‌منظور لحاظ نمودن اثر عدم‌قطعیت در این کار تحقیقاتی از روش تولید سناریو بر اساس روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده می‌شود؛ بنابراین، در این قسمت روش تولید سناریو و شبیه‌سازی با روش مونت‌کارلو بیان می‌شود. پس به طور کلی می‌توان گفت عدم قطعیت‌ها به سه دسته‌ی عدم قطعیت در میزان تقاضای بار، تولید از منبع خورشیدی و تولید نیروگاه بادی تقسیم می‌شوند.

۴-۲-۱ عدم‌قطعیت در بار الکتریکی

روش‌های مونت‌کارلو یک دسته از الگوریتم‌های محاسباتی هستند که مبتنی بر تکرار تصادفی نمونه‌برداری برای محاسبه نتایج هستند. روش‌های مونت‌کارلو به‌طورکلی زمانی استفاده می‌شوند که امکان محاسبه نتیجه دقیق با یک الگوریتم قطعی نباشد؛ بنابراین به دلیل اتکای این روش به تکرار محاسبات و اعداد تصادفی، مناسب برای محاسبه توسط رایانه است. روش‌های مونت‌کارلو درواقع یکی از جامع‌ترین ابزارها برای ارزیابی مطالعات دارای عدم‌قطعیت هستند. الگوی کلی روش‌های مونت‌کارلو مطابق زیر است [۱۹]:

- تعریف دامنه ورودی‌های ممکن
- تولید ورودی‌های تصادفی از دامنه
- اجرای یک عملیات قطعی بر روی ورودی‌ها

- تخمین امید ریاضی خروجی با میانگین‌گیری کلیه خروجی‌های به‌دست‌آمده
- جمع‌بندی نتایج حاصل از تک‌تک محاسبات در نتیجه نهایی

فرض شود X یک متغیر تصادفی با تابع چگالی احتمال $P(X)$ در مجموعه گسسته χ باشد. لذا مقدار قابل انتظار برای تابع هدف $F(X)$ بر مجموعه χ عبارتست از:

$$E(F)=\sum_{x\in\chi}F(x)P(x) \quad (۳۶)$$

طبق [۱۹]، $\hat{E}(F)$ می‌تواند تخمینی برای $E(F)$ باشد.

$$\hat{E}(F)=\frac{1}{NS}\sum_{i=1}^{NS}F(x_i) \quad (۳۷)$$

که در رابطه فوق، NS تعداد نمونه‌ها، X_i مقدار iامین نمونه و $F(x_i)$ نتیجه تست برای iامین نمونه است. ازآنجایی‌که X و $F(X)$ تصادفی هستند لذا $\hat{E}(F)$ نیز یک متغیر تصادفی است. واریانس $\hat{E}(F)$ طبق تعریف مطابق رابطه زیر است:

$$V(\hat{E}(F))=\frac{V(F)}{NS} \quad (۳۸)$$

که، $V(F)$ واریانس تابع F است و مطابق رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$\hat{V}(F)=\frac{1}{NS-1}\sum_{i=1}^{NS}(F(x_i)-\hat{E}(x_i))^2 \quad (۳۹)$$

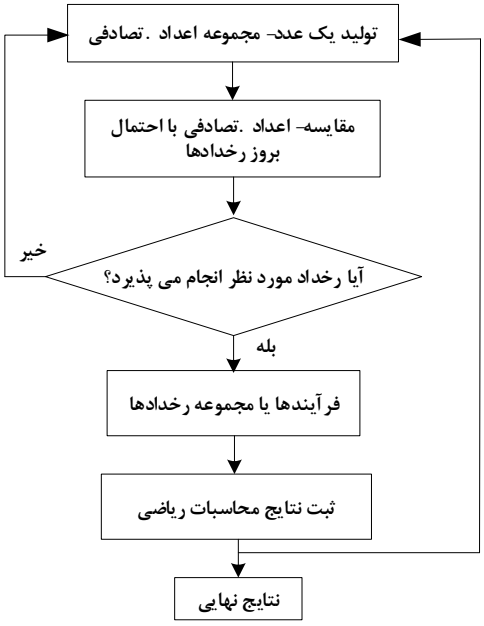
ازاین‌رو، میزان خطا در شبیه‌سازی مونت‌کارلو، β مطابق رابطه‌ی (۴۰) محاسبه می‌شود. فلوچارت کلی الگوریتم‌های مونت‌کارلو در شکل (۳) آمده است.

$$\beta=\frac{\sqrt{\frac{V(F)}{NS}}}{\hat{E}(F)} \quad (۴۰)$$

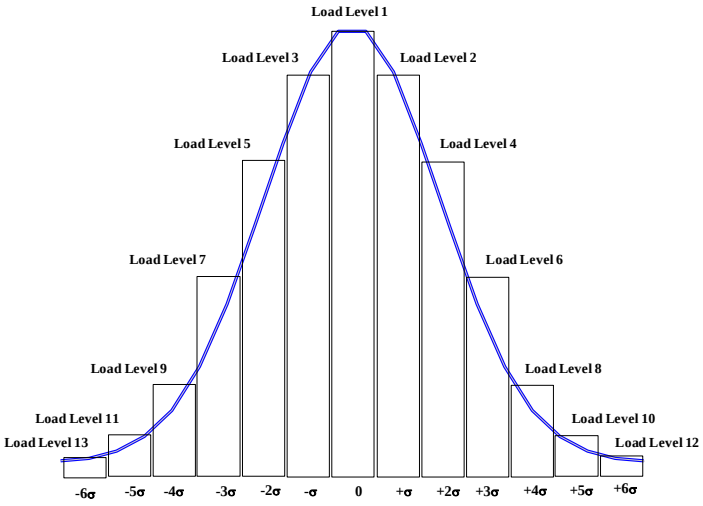
همان‌طور که در [۱۹] آمده است، به‌طورکلی عدم‌قطعیت‌های معین در سیستم قدرت با توابع توزیع احتمالاتی تخمین زده می‌شوند. به‌عنوان‌مثال بارها و خروجی منابع تجدید پذیر انرژی در سیستم قدرت با توابع توزیع احتمالی نرمال تخمین زده می‌شوند [۲۰]. قابل‌ذکر است که، روش

ارائه‌شده در این کار تحقیقاتی می‌تواند برای هر نوع تابع توزیع احتمالی نیز به کار رود.

فرض شود یکی از بارهای سیستم قدرت دارای تابع توزیع احتمالی نرمال با انحراف معیار σ باشد. ازآنجایی‌که تابع توزیع نرمال یک تابع پیوسته است بنابراین، احتمال وقوع هر نقطه بار را نشان نمی دهد بلکه چگالی احتمال را نشان می‌دهد. برای اینکه احتمال وقوع سطح بار مختلف شبکه مشخص شود، باید تابع پیوسته با یک تابع نرمال ناپیوسته تخمین زده شود. در این تقریب‌زنی، هرچه پله‌های لحاظ شده برای تقریب، کوچک‌تر باشند، خطای تقریب کمتر است. به‌عنوان‌مثال، تابع نرمال فوق و تقریب آن با سیزده پله در شکل (۴) نشان‌داده‌شده است [۲۱]. در این شکل محور افقی مقدار بار و محور عمودی احتمال وقوع هر سطح بار است، بنابراین، می‌توان این شکل را توسط رابطه زیر نیز بیان نمود که بردار P احتمالات وقوع سطوح مختلف بار را نمایش می‌دهد، و متغیرهای P_1 تا P_n به ترتیب بیان‌کننده احتمال وقوع سطوح بار I_1 تا I_n هستند. ازاین‌رو، توابع نامعین موجود در مسئله را می‌توان با یک معادله مطابق رابطه زیر بیان نمود.



شکل (۳): فلوچارت الگوریتم مونت‌کارلو



شکل (۴): تخمین بارالکتریکی توسط تابع توزیع نرمال ناپیوسته

$$P=\begin{cases}P_1 & \text{Load}=I_1\\ P_2 & \text{Load}=I_2\\ \vdots & \\ P_n & \text{Load}=I_n\end{cases} \quad (۴۱)$$

بعد از تعریف عدم‌قطعیت‌های مسئله، مرحله بعد تولید سناریو بر اساس نامعینی‌ها است. در این مرحله، یک عدد تصادفی برای هر پارامتر نامعین بر مبنای تابع توزیع متغیر تولید می‌گردد. به‌عنوان‌مثال تابع نرمال فوق دارای میانگین ۵۶ و انحراف معیار ۱۶ درصد است، یک عدد تصادفی بر مبنای این توزیع نرمال، برای این پارامتر تولید می‌شود. سپس احتمال وقوع این سطح بار از رابطه فوق محاسبه می‌شود. بنابراین در سناریوی حاضر، هم سطح بار و هم احتمال وقوع این سطح بار برای تمام بارهای شبکه می‌تواند محاسبه شود. این روند برای سایر پارامترهای نامعین شبکه نیز به کار می‌رود تا در نهایت در هر سناریو، هر پارامتر نامعین با یک مقدار و یک احتمال وقوع، مشخص می‌شود. همچنین احتمال وقوع سناریو نیز با ضرب تک‌تک احتمالات محاسبه خواهد شد. همچنین قابل‌ذکر است که در این مقاله خودروهای الکتریکی در نقش ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی لحاظ شده‌اند که قیود مربوطه در رابطه‌های ۳ تا ۱۰ آمده است و نحوه شارژ و دشارژ آنها توسط الگوریتم برنامه‌نویسی تعیین می‌شود.

۴-۲-۲ مدل عدم‌قطعیت باد

یکی از مهم‌ترین توابعی که برای تخمین سرعت باد در یک منطقه به کار می‌رود تابع توزیع ویبل است که تابع چگالی احتمال آن به‌صورت زیر است [۲۲].

$$f_U(U)=\begin{cases}0 & U<0\\ \frac{K}{C}\left(\frac{U}{C}\right)^{K-1}e^{-\left(\frac{U}{C}\right)^K} & U\geq 0\end{cases}$$

(۴۲)

در رابطه فوق، U سرعت باد، C و K به ترتیب پارامترهای مقیاس و شکل در توزیع ویبل می‌باشند. این پارامترها از مقدار میانگین (μ_U) و واریانس (σ_U^2) سرعت باد به دست می‌آیند، که مطابق روابط زیر می‌باشند.

$$\mu_U = C\,\Gamma\left(1+\frac{1}{K}\right)$$

(۴۳)

$$\sigma_U^2 = C^2\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{K}\right)-\left[\Gamma\left(1+\frac{1}{K}\right)\right]^2\right]$$

(۴۴)

در روابط فوق، Γ، تابع گامای لژاندر است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma(z)=\int_0^\infty t^{z-1}e^{-t}dt$$

(۴۵)

با جایگزینی $K=2$، تابع توزیع رایلی حاصل می‌شود؛ بنابراین، رابطه (۴۳) به‌صورت رابطه زیر در می‌آید.

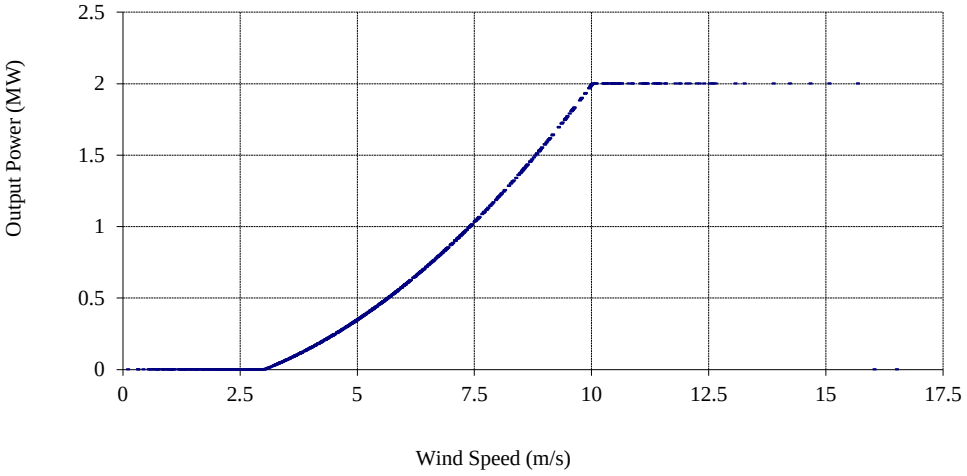
$$\mu_U = \frac{\sqrt{\pi}}{2}C$$

(۴۶)

منحنی توان خروجی یک توربین بادی مطابق رابطه (۱) بیان می‌شود. نیز، اطلاعات فوق توسط شرکت سازنده توربین بادی در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد. در شکل (۵) تابع توان خروجی یک توربین بادی برای ۲۰۰۰۰ نمونه سرعت تصادفی باد با توزیع رایلی آمده است. برای یک مزرعه بادی که از n توربین بادی تشکیل‌شده است می‌توان نوشت:

$$P_R\ |_{WF} = nP_R\ |_{WT}$$
$$U_{CI}\ |_{WF} = U_{CI}\ |_{WT}$$
$$U_R\ |_{WF} = U_R\ |_{WT}$$
$$U_{CO}\ |_{WF} = U_{CO}\ |_{WT}$$

(۴۷)



شکل (۵): تابع توان خروجی یک توربین بادی

۳-۲-۴ مدل عدم‌قطعیت در تولید توسط PV

برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت سیستم فتوولتاییک دقیقاً مطابق رویه به‌کاررفته در مدل‌سازی انرژی بادی و بار الکتریکی استفاده می‌شود با این تفاوت که در این حالت از تابع چگالی احتمال بتا برای تابش یا همان $G(t)$ به کار برده می‌شود. رابطه تابع چگالی احتمال بتا (betapdf) مطابق زیر است:

$$betapdf\ (x,a,b) = \frac{1}{B(a,b)} x^{a-1}(1-x)^{b-1}$$

(۴۸)

که در آن a و b به ترتیب پارامترهای اولیه و ثانویه تابع بتا (B) هستند که در آن:

$$B(a,b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)}$$

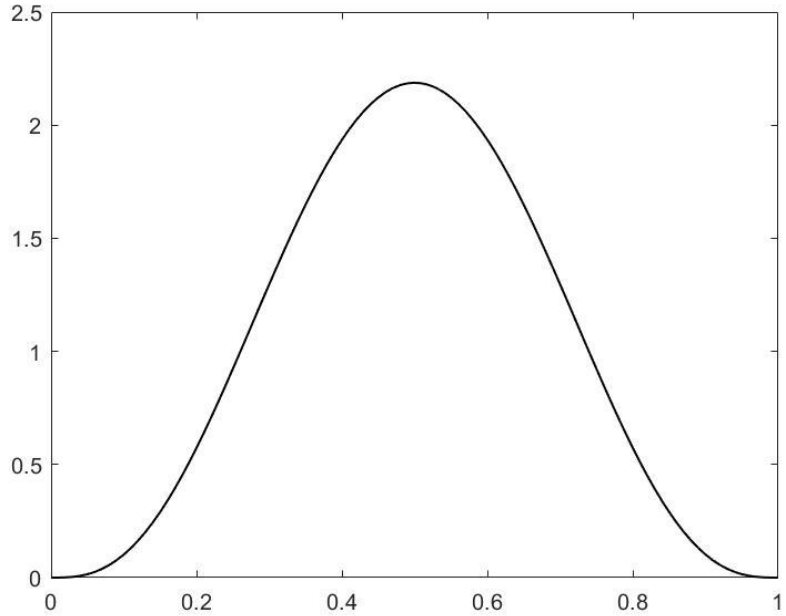
(۴۹)

در شکل (۶) تابع چگالی احتمال بتا به‌ازای a=b=4 رسم شده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

۵-۱ شبیه‌سازی بار الکتریکی

بیه‌سازی مربوط به پروفیل بار در چهار دوره‌ی ۶ ساعته صورت‌گرفته است. نتایج حاصل از تخمین و پیش‌بینی بار الکتریکی منطبق بر الگوریتم مونت‌کارلو در شکل‌های (۷)-الف تا د برای هر دوره‌ی زمانی آمده است. مقدار نهایی بار الکتریکی و بار حرارتی در جدول (۲) آمده است. در فصل چهارم به بررسی کامل این موارد پرداخته شد.

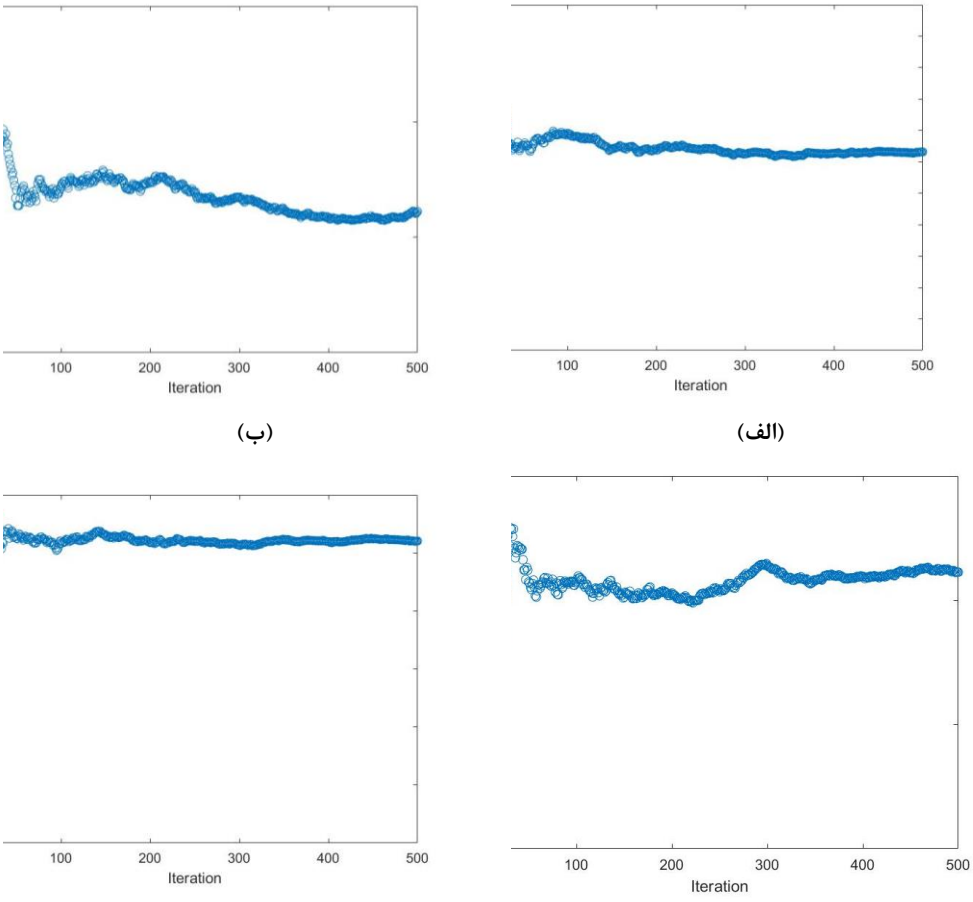


شکل (۶): تابع چگالی احتمال بتا به ازای پارامترهای a=b=4

جدول (۲): اطلاعات مربوط به بارهای الکتریکی و حرارتی

بار حرارتی (kW_{heat})	بار الکتریکی (kWh)	بازه زمانی
۱۸/۰۳۶	۷۸۰/۳۲	۱
۱۴/۵۳۳	۲۵۴۶/۱۲	۲

۳	۲۵۰۶/۱۲	۱۰/۸۳۸
۴	۸۹۶/۴۲	۰/۰



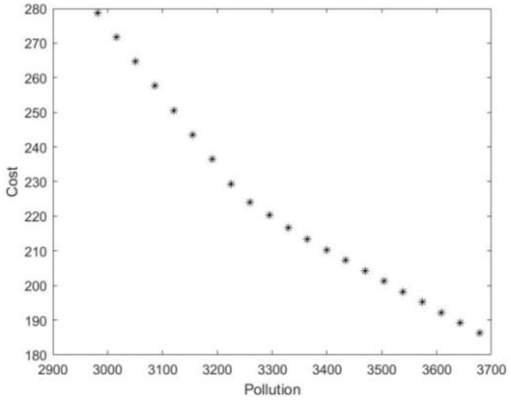
(ب) (الف)

(د) (ج)

شکل (۷): پروفیل بار (الف) مقدار بار در بازه‌ی اول، (ب) مقدار بار در بازه‌ی دوم، (ج) مقدار بار در بازه‌ی سوم و (د) مقدار بار در بازه‌ی چهارم

۵-۲ شبیه‌سازی سناریوهای متفاوت منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر

در سناریوی اول پاسخ بهینه برای حالتی در نظر گرفته می‌شود که تنها منابع تجدیدناپذیر مانند میکروتوربین در دسترس هستند. هدف از شبیه‌سازی این سناریو، در نظر گرفتن تأمین بار ساختمان بدون استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی است. اما بهینه‌سازی در چنین حالتی نتیجه نمی‌دهد. بنابراین لازم است برخی بارهای غیرضروری از مدار خارج شوند. نتایج این سناریو با حذف ۵۰ درصد از بارهای غیرضروری در بازه‌های زمانی شش ساعت دوم و سوم (به دلیل شرایط بحرانی ایجاد شده در سمت تولید) در شکل (۸) و جدول (۳) آمده است.



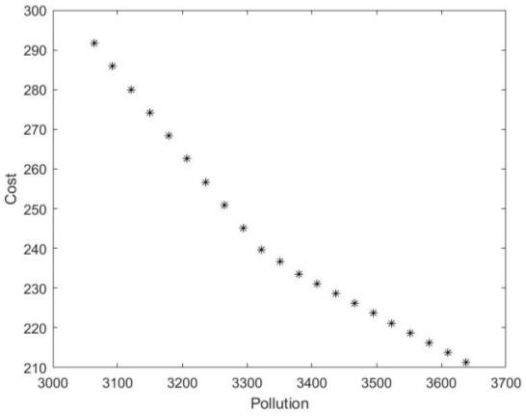
شکل (۸): نتایج پارتو حاصل از سناریو اول

جدول (۳): خروجی حاصل از سناریو اول

	CHP	MT	PV	Wind	Electrical storage charge & discharge	Boiler	Thermal Storage	Electricity import	Electricity export
T=1	90	35.053	0	0	5	65.41	5	0	0
T=2	90	122	0	0	0	64.62	-3	0	0
T=3	90	121	0	0	-3	56.18	0	0	0
T=4	90	56.403	0	0	3	36.92	3	0	0
Cost: 220.340 $/day, Pollution: 3294.770 kg									

در این سناریو برای نشان‌دادن اهمیت منابع تجدیدپذیر انرژی شبیه‌سازی در حضور آنها انجام شد

و دیده شد که در این حالت هم هزینه و هم آلودگی کاهش‌یافته است که قطعاً مطلوب است. نتایج این سناریو در شکل (۹) و جدول (۴) آمده است. پس از اجرای برنامه ۲۱ پاسخ شبه بهینه حاصل می‌شود که مطابق شکل (۹) است.



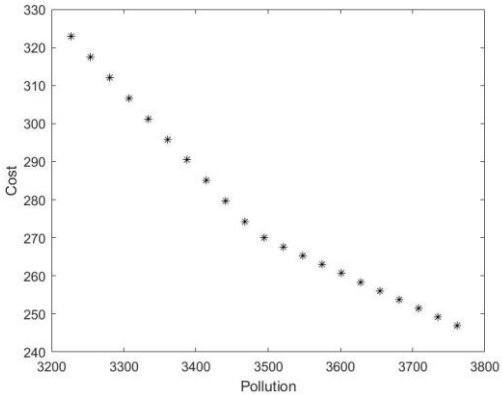
شکل (۹): مجموعه جواب‌های شبه‌بهینه

جدول (۴): خروجی منابع به‌کاررفته در سناریو دوم

	CHP	MT	PV	Wind	Electrical storage charge & discharge	Boiler	Thermal Storage	Electricity import	Electricity export
T=1	90	16.391	0	18.662	5	65.41	5		0
T=2	90	150	155.779	18.662	6	64.62	-3	3.912	0
T=3	90	129.141	187.797	13.749	-3	56.18	0	0	0
T=4	90	62.403	0	0	-3	36.92	3	3	0

Cost: 239.72 $/day, Pollution: 3322.37 kg

باتوجه‌به عدم‌قطعیت باد، در شرایطی که بحران به وجود می‌آید، ممکن است وزش باد متوقف شود. این امر نباید کارکرد سیستم را دچار وقفه کند و برنامه‌ریزی انرژی در چنین شرایطی باید ممکن باشد؛ لذا شکل (۱۰) نمایانگر این است که در این شرایط نیز سیستم قادر است به رفع نیازهای بار ساختمان بپردازد. جدول (۵) نیز خروجی منابع به‌کاررفته در سناریو سوم را نشان می‌دهد.

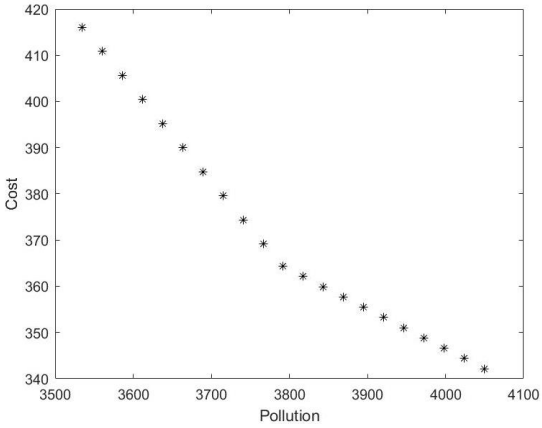


شکل (۱۰): مجموعه جواب‌های شبه‌بهینه در سناریو سوم

جدول (۵): خروجی منابع به‌کاررفته در سناریو سوم

	CHP	MT	PV	Wind	Electricalstorage charge & discharge	Boiler	Thermal Storage	Electricity import	Electricity export
T=1	90	35.053	0	0	5	65.41	5		0
T=2	90	150	155.779	0	6	64.62	-3	22.574	0
T=3	90	142.89	187.797	0	-3	56.18	0		0
T=4	90	62.403	0	0	-3	36.92	3		0
Cost: 274.170 $/day, Pollution: 3467.600 kg									

شرایط سناریوی سوم می‌تواند در مورد انرژی PV نیز صادق باشد. در این سناریو شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن انرژی فتوولتاییک انجام شده است و باتوجه‌به ماکزیمم مقادیر تولیدی هر یک از واحدها و همچنین محدود بودن توان عبوری از خط انتقال بین شبکه و ساختمان این منابع توانایی تامین بار الکتریکی را ندارند و مسئله به جواب بهینه نمی‌رسد. در این حالت چاره‌ای جز حذف بارهای غیرضروری نیست. بنابراین، با کاهش ۲۵ درصدی تقاضای الکتریکی در بازه‌های زمانی شش ساعت دوم و سوم، نتایج مطابق شکل (۱۱) و جدول (۶) به دست خواهد آمد.



شکل (۱۱): مجموعه جواب‌های شبه‌بهینه در سناریوی بهینه‌شده‌ی چهارم

جدول (۶): خروجی منابع به‌کاررفته در سناریوی بهینه‌شده‌ی چهارم

	CHP	MT	PV	Wind	Electrical storage charge and discharge	Boiler	Thermal Storage	Electricity import	Electricity export
T=1	90	16.391	0	18.662	5	65.41	5		0
T=2	90	150	0	18.662	-3	64.62	-3	62.338	0
T=3	90	150	0	13.749	6	56.18	0	52.251	0
T=4	90	62.403	0	0	-3	36.92	3		0

Cost: 369.170 $/day, Pollution: 3766.380 kg

مطابق نتایج به دست آمده در هر چهار سناریو اهداف تعیین شده، مورد دسترسی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده که حاصل یک برنامه‌ریزی دقیق است این امکان را برای بهره‌بردار فراهم می‌آورد تا ضمن کاهش آلودگی هوا، در هر شرایطی بتواند با در نظر گرفتن منابع متفاوت، به بار مورد تقاضا پاسخ دهد. طبیعی است که در شرایطی که انرژی باد و خورشید در دسترس باشد، میزان آلودگی کمتر از سایر حالات است (با فرض تأمین بار کامل چرا که در سناریوی اول ۵۰ درصد از بار در دو بازه حذف شد). همچنین، در این حالت هزینه‌ها بیشتر هستند. انتخاب هر پاسخ از پاسخ‌های شکل (۸) تا (۱۱) صحیح است چراکه تمام آن‌ها در جبهه‌ی پارتو قرار دارند. بنابراین، در صورت نیاز به هزینه‌ی پایین‌تر، با آلودگی بیشتر می‌توان به هدف رسید.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به برنامه‌ریزی ساختمان انرژی صفر با دو هدف رفع نیاز در زمان بحران کشور و رعایت اصول پدافند غیر عامل که در نظام آنارشیک بین المللی توجه ویزه ای به آن دارند و می توان در ساختمان های مهم نظامی و سیاسی کشور استفاده و توجه ویژه ای به آن داشت، کاهش هزینه و آلودگی پرداخته شد. به جهت باز بودن دست بهره‌بردار سیستم و در راستای تنوع بخشی به منابع تأمین کننده ی انرژی از انواع مختلف منابع استفاده شد. استفاده از منابع باد و خورشید، نیز بار الکتریکی مورد تقاضای ساختمان دارای عدم قطعیت است. به همین علت این عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم مونت کارلو، تابع توزیع ویبل و بتا در نظر گرفته شد. به جهت حل مسئله‌ی بهینه‌سازی چند هدفه نیز از روش اپسیلون محدودیت افزایشی استفاده شد. در پایان، چهار سناریوی مختلف مورد بحث قرار گرفت و میزان بهینه‌ی بهره‌برداری از هر نوع از منابع انرژی تعیین شد و می توان این مطالعات را به منظور برنامه ریزی و اجرا در یک ساختمان انرژی صفر در نظر گرفت و آن را در ساختمان های سیاسی مهم کشور و ستاد های نیروهای مسلح به مرحله اجرا درآورد.

مراجع

[1] European Commission, 2005, " Doing More with Less", Green Paper on energy efficiency 22.06.2005 COM(2005).

[2] U.S. Energy Information Administration, "Energy Efficiency Trends in Residential and Commercial Buildings," Energy Information Administration, 2008.

[3] M. Alirezaei, M. Noori ,O.Tatari, "Getting to net zero energy building: Investigating the role of vehicleto home technology," Energy and Buildings, vol. 130, p. 465–476, 2016.

[4] L. Wang and C. Singh, "Multicriteria Design of Hybrid Power Generation Systems Based on a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 1, pp. 163-172, March 2009 (doi: 10.1109/TEC.2008.2005280).

[5] A. Bedir, B. Ozpineci and J. E. Christian, "The impact of plug-in hybrid electric vehicle interaction with energy storage and solar panels on the grid for a zero energy house," IEEE PES T&D 2010, 2010, pp. 1-6 (doi: 10.1109/TDC.2010.5484349).

[6] H. Gong, V. Rallabandi, D. M. Ionel, D. Colliver, S. Duerr and C. Ababei, "Dynamic Modeling and Optimal Design for Net Zero Energy Houses Including Hybrid Electric and Thermal Energy Storage," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 4, pp. 4102-4113, July-Aug. 2020 (doi: 10.1109/TIA.2020.2986325).

[7] Jan Engelhardt, Jan Martin Zepter, Tatiana Gabderakhmanova, Mattia Marinelli, Energy management of a multi-battery system for renewable-based high power EV charging, eTransportation, Volume 14, 2022, 100198, ISSN 2590-1168 (doi:10.1016/j.etran.2022.100198).

[8] X. Guan, Z. Xu and Q. -S. Jia, "Energy-Efficient Buildings Facilitated by Microgrid," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 3, pp. 243-252, Dec. 2010 (doi: 10.1109/TSG.2010.2083705).

[9] C. Marnay, G. Venkataramanan, M. Stadler, A. S. Siddiqui, R. Firestone and B. Chandran, "Optimal Technology Selection and Operation of Commercial-Building Microgrids," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 3, pp. 975-982, Aug. 2008 (doi: 10.1109/TPWRS.2008.922654).

[10] S. Kahrobaee, S. Asgarpoor and W. Qiao, "Optimum Sizing of Distributed Generation and Storage Capacity in Smart Households," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 4, pp. 1791-1801, Dec. 2013 (doi: 10.1109/TSG.2013.2278783).

[11] Longxi Li, Hailin Mu, Nan Li, Miao Li, Economic and environmental optimization for distributed energy resource systems coupled with district energy networks, Energy, Volume 109, 2016, Pages 947-960, ISSN 0360-5442 (doi;10.1016/j.energy.2016.05.026).

[12] N. G. Paterakis, O. Erdinç, I. N. Pappi, A. G. Bakirtzis and J. P. S. Catalão, "Coordinated Operation of a Neighborhood of Smart Households Comprising Electric Vehicles, Energy Storage and Distributed Generation," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 6, pp. 2736-2747, Nov. 2016 (doi: 10.1109/TSG.2015.2512501).

[۱۳] دفتر امور مقررات ملّی ساختمان، مبحث سیزدهم مقررات ملی ساختمان طرح و اجرای تأسیسات برقی ساختمان‌ها، نشر توسعه ایران، چاپ سیزدهم، ۱۳۹۲.

[14] Singh, Mohit & Santoso, Surya. (2011). Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants. Wind Power: Systems Engineering Applications and Design Models (doi.org/10.2172/1028524).

[15] A. Betz, “Wind Energy and its Exploitation by Windmills,” Gottingen: Van-denhoeck und Ruprccht, p. 64, 1926.

[16] H. Glauert, “Windmills and fans,” Aerodynamic theory, vol. 3, 1935.

[17] P. Maghouli, S. H. Hosseini, M. O. Buygi, and M. Shahidehpour, "A scenario-based multi-objective model for multi-stage transmission expansion planning," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 1, pp. 470-478, 2010 (doi: 10.1109/TPWRS.2010.2048930).

[18] Mavrotas G. Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems. Applied mathematics and computation. 2009 Jul 15;213(2):455-65 (doi: 10.1016/j.amc.2009.03.037).

[19] X.-F. Wang, Y. Song, and M. Irving, Modern power systems analysis. Springer Science & Business Media, 2010.

[20] A. Rastgou, S. Bahramara, and J. Moshtagh, "Flexible and robust distribution network expansion planning in the presence of distributed generators," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 28, no. 12, p. e2637, 2018 (doi: 10.1002/etep.2637).

[21] V. Vahidinasab, "Optimal distributed energy resources planning in a competitive electricity market: Multiobjective optimization and probabilistic design," Renewable energy, vol. 66, pp. 354-363, 2014 (doi: 10.1016/j.renene.2013.12.042).

[22] Z. Lubosny and Z. Lubosny, Wind turbine operation in electric power systems: advanced modeling. Springer, 2003 (doi: 10.1007/978-3-662-10944-1)