

برنامه‌ریزی ساختمان انرژی صفر با حضور انواع منابع تولیدکننده انرژی، با در نظر گرفتن ذخیره ساز الکتریکی و حرارتی در پدافند غیر عامل

رضا سپه‌وند^{۱*}، حامد سپه‌وند^۲، اکبر اصغرزاده بناب^۳، مجتبی رضایی^۴

چکیده

ساختمان‌های انرژی صفر یکی از موضوعات به‌روز در حوزه 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 برنامه‌ریزی و استفاده از ساختمان‌های انرژی صفر می‌تواند نقش بسزایی در رعایت اصول پدافند غیر عامل داشته باشد. از این ساختمان‌ها می‌توان در سازمان‌ها و ارگان‌های مهم سیاسی کشور و در ستاد‌های فرماندهی نیروهای مسلح کشور در زمان بحران استفاده نمود. محاسبات به‌گونه‌ای 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 افسیلون 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.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۲/۱۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۲/۱۵

کلمات کلیدی:

ساختمان انرژی صفر،

ایستگاه شارژ

خودروهای برقی،

بهینه‌سازی چندهدفه،

روش محدودیت

افسیلون تقویت شده

* (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران sepahvand@iamu.ac.ir

^۱ مدرس، گروه مهندسی برق، آموزش و پرورش استان لرستان، خرم‌آباد، ایران mohandessepahvand@gmail.com

^۲ استادیار، گروه مطالعات علم و فناوری، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران akbar.asgharzadeh@casu.ac.ir

^۴ محقق، گروه مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران mojtaba71rezaei@gmail.com

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 مطرح کردن بحث ساختمان به این علت 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 CO₂، ۵۲٪ از گاز SO₂ و ۲۰٪ از گاز NO_x به اتمسفر است که با توجه به مواردی چون گرمایش جهانی به علت افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، تغییرات اقلیم و ... چنین اعدادی به هیچ‌وجه قابل توجه نیستند. با در نظر داشتن 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 به صورت جامع ارائه می‌شود. استفاده از خودروهای برقی در سال‌های اخیر شتاب گرفته است و پیش‌بینی می‌شود در آینده‌ی 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 PV² و باتری به عنوان ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده است. سناریوهای متفاوتی در این مرجع چون در نظر گرفتن حالت اتصال به شبکه بدون هرگونه عدم قطعیت، اتصال به شبکه با در نظر گرفتن ایجاد خطا در تجهیزات شبکه و عدم قطعیت در تولید منابعی چون ماژول PV و باد به علت پیش‌بینی ناپذیر بودن سرعت باد و شدت تابش نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، عدم قطعیت در بار مصرفی و در نظر گرفتن بار متغیر به صورت تصادفی نیز از موارد بررسی شده در این مرجع است. مرجع [۵]، یک ساختمان صفر انرژی با منبع انرژی PV و در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌ساز را معرفی کرده است که ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز در آن در نظر گرفته شده است. مطابق گفته نویسنده، هدف از این پژوهش برقراری هماهنگی میان سیستم ذخیره‌ساز انرژی، منبع PV و ایستگاه شارژ خودرو برقی به منظور کاهش پیک بار 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 دیزل ژنراتور جهت جبران انرژی مصرفی ارائه شده است. مرجع [۷] به بررسی امکان ایجاد ایستگاه شارژ سریع خودروهای برقی به منظور 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 به کارگیری 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. نویسندگان معتقد است که مطالعات ریزش شبکه* 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 در نظر گرفتن 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 به‌سزایی در کاهش عدم قطعیت دارد. در مرجع [۱۲] مجموعه‌ای مسکونی در نظر گرفته شده است که متصل به شبکه‌ی برق هستند. تمام این منازل دارای منابع تولید تجدیدپذیر و ایستگاه شارژ خودروهای برقی هستند. هدف در این پژوهش برنامه‌ریزی جهت رسیدن به یک ساختمان با انرژی صفر با استفاده از منابع تولید پراکنده بوده که به نوبه خود به جهت رعایت اصول پدافند غیر عامل بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله جهت حل مشکلات عدم قطعیت، عدم توازن تولید و مصرف در ساختمان‌های صفر انرژی و با رویکرد در نظر گرفتن ایستگاه ذخیره‌ساز انرژی (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 فراهم کردن 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 در نظر گرفتن سیستم گرمایش در فصل گرما نیست؛ اما سیستم روشنایی همواره و در تمام فصول مورد استفاده 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. به‌عنوان مثال، خاموش کردن 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 مورد نظر به کار گرفته می‌شود، در نظر گرفته شده است. (حاصل ضرب 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 کیلووات ساعت در سال	چای ساز	۴۴
کامپیوتر	۵۰	آسانسور	۲۰۰ کیلووات ساعت در روز
پمپ آب	۳	پرینتر و فکس	۵
تلویزیون	۱،۵	خشک کن برقی دست	۱،۸
ماکروویو	۱۸	ماشین لباسشویی	۱۰
یوپی اس	۶	انواع فن	۲
جاروبرقی صنعتی	۲۰	آب سردکن	۱۲
ماشین ظرفشویی	۲۴	سیستم خنک کننده	۱۵۰
سایر	۱۵	جمع کل	۴۸۶،۲۹

تا اینجا اعداد به صورت لحظه‌ای و پیک بار محاسبه شدند. در نظر گرفتن جمع این اعداد برای در نظر گرفتن بدترین حالت^۲ ضروری است؛ اما، در مباحث طراحی انواع بارهای بالا به صورت 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 دیمانده هستند، مانند پیچ گوشتی برقی، انرژی برخی از بارها به صورت روتین و در ساعات مشخصی از روز باید تأمین شود. به عنوان مثال، در یک دفتر اداری برای تأمین نور مورد نیاز 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 نشان‌دهنده مصرف بار مورد تقاضای ساختمان پس از در نظر گرفتن انواع موارد مصارف در زمان‌های متفاوت طی یک سال 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 (کیلووات ساعت)

نوع مصرف	بازه زمانی	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
پیک بار		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 کیلووات ساعت			

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. باتوجه به یکی از اهداف مسئله که موضوع کمینه کردن آلودگی محیط زیست است، لازم است تا منابع تجدیدپذیر مانند نیروگاه های بادی و خورشیدی به هر ترتیبی در نظر گرفته شوند. بدیهی است که چنین نیروگاه هایی عدم قطعیت دارند و این مشکل می تواند 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 می توان از تلاطماتی که در این بین برای توربین اتفاق می افتد صرف نظر کرد. تحلیل آیرودینامیکی توربین بادی توسط Betz [۱۵] و Glauert [۱۶] و توان در دسترس توسط باد مطابق رابطه ۱ است.

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & \forall t : V_t^{cutin} \geq V_t \text{ and } V_t^{cutout} \leq V_t \\ 0.5 \cdot \rho \cdot a \cdot \eta^W \cdot \min(V_t, V_t^{nom})^3 & \forall t : V_t^{cutin} \geq V_t \geq V_t^{cutout} \end{cases} \quad (1)$$

که در رابطه ی بالا، P_{WT} توان توربین بادی (kW)، V_{cut-in} حداقل سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه (m/s)، $V_{cut-out}$ حداکثر سرعت باد بر حسب 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 بر حسب متر بر ثانیه (m/s) است.

۳-۲ مدل نیروگاه خورشیدی

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

$$P_{PV}(t) = \left(\left[P_{PV,STC} \times \frac{G(t)}{G_{ref}} \times (1 - \gamma \times (T(t) - T_0)) \right] \times N_{PVs} \times N_{PVp} \right) \quad (2)$$

در این رابطه، N_{PVs} تعداد ماژول های سری در یک آرایه، N_{PVp} تعداد ماژول های موازی در یک آرایه، T_0 دمای مرجع سلول در شرایط تست استاندارد ($25^\circ C$)، $T(t)$ دمای سلول در لحظه ی t ، $G(t)$ میزان تابش در لحظه ی t $P_{PV,STC}$ توان خروجی ماژول PV در شرایط تست استاندارد و γ ضریب حرارت توان است.

۳-۳ مدل منابع ذخیره ساز الکتریکی و حرارتی

باتوجه به نیاز به ذخیره سازی و در راستای تنوع بخشی به منابع تأمین کننده ی انرژی، ذخیره سازی در دو نوع الکتریکی و حرارتی صورت می پذیرد. معادلات ۳ تا ۱۰ مدل و محدودیت های ذخیره ساز استفاده شده در مدل را نمایش می دهد.

$$P_{ES}(t) = E_S(t) - E_S(t-1) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

در این رابطه، $P_{ES}(t)$ توان ذخیره سازی الکتریکی در زمان t بر حسب کیلووات، $E_S(t)$ انرژی ذخیره سازی الکتریکی در زمان t بر حسب کیلووات ساعت و t زمان بر حسب ساعت است.

$$E_S^{\min} \leq E_S(t) \leq E_S^{\max} \quad (4)$$

در رابطه ی (۴)، E_S^{\min} و E_S^{\max} به ترتیب حداکثر و حداقل انرژی ذخیره سازی الکتریکی هستند. این محدودیت بیان می کند که انرژی ذخیره ساز همواره در یک بازه محدود شده است.

$$\begin{cases} E_S^{\min} - E_S(0) \leq \sum_{k=1}^t P_{ES}(k) \leq E_S^{\max} - E_S(0) \\ (\forall t = 1, 2, \dots, T) \end{cases} \quad (5)$$

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

$$E_S(0) = E_S(T) \quad (6)$$

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.

$$P_{TS}(t) = TE_S(t) - TE_S(t-1) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

در این رابطه $P_{ES}(t)$ توان ذخیره‌سازی الکتریکی در زمان t (kW) و $TE_S(t)$ انرژی ذخیره‌سازی حرارتی در زمان t (kWh_{heat}) است. $TE_S^{\min} \leq TE_S(t) \leq TE_S^{\max}$ (۸)

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

$$\begin{cases} TE_S^{\min} - TE_S(0) \leq \sum_{k=1}^t P_{TS}(k) \leq TE_S^{\max} - TE_S(0) \\ (\forall t = 1, 2, \dots, T) \end{cases} \quad (9)$$

$$TE_S(0) = TE_S(T) \quad (10)$$

چند قید لحاظ شده به این صورت است که مقدار ابتدایی و نهایی انرژی ذخیره‌شده در باتری‌ها باید یکسان باشد، شارژ و دشارژ باتری‌ها دارای محدودیت تعریف‌شده است و همچنین یک حداقل و حداکثر ظرفیت تعریف‌شده برای باتری‌ها وجود دارد. لازم به ذکر است عدم قطعیت بار، باد و خورشید به ترتیب با استفاده از الگوریتم مونت کارلو، 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 به‌طور کلی هزینه‌های پس از بهره‌برداری می‌شود. با توجه به موارد گفته شده، هزینه کل سیستم موردنظر به شرح زیر است:

$$\begin{cases} F(\text{Cost}) = \sum_{t=1}^T (C_{CHP}(t) + C_{Wind}(t) + C_{Boiler}(t) + C_{PV}(t) + \\ C_{Buy}(t) - C_{Sell}(t) + C_{ES}(t) + C_{TS}(t) + C_{MT}(t)) \end{cases} \quad (11)$$

که در آن $F(\text{Cost})$ 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.

$$C_{CHP}(t) = \left(\sum_{t=1}^T \left(\frac{C_{Fuel} \cdot P_{CHP}(t) \cdot \theta}{\eta_{CHP}} + C_{OP-CHP} \cdot P_{CHP}(t) \cdot \theta \right) + C_{M-CHP} \right) \quad (12)$$

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

$$C_{Wind}(t) = \sum_{t=1}^T C_{OP-WT}(t) \cdot P_{WT}(t) \cdot \theta + C_{CONS-WT} \quad (13)$$

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

$$C_{PV}(t) = \sum_{t=1}^T C_{OP-PV}(t) \cdot P_{PV}(t) \cdot \theta + C_{CONS-PV} \quad (14)$$

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

$$C_{Boiler}(t) = \left(\sum_{t=1}^T \left(\frac{C_{Fuel} \cdot P_{Boiler}(t) \cdot \theta}{\eta_{Boiler}} + C_{OP-Boiler} \cdot P_{Boiler}(t) \cdot \theta \right) + C_{M-Boiler} \right) \quad (15)$$

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

$$C_{MT}(t) = \left(\sum_{t=1}^T \left(\frac{C_{Fuel} \cdot P_{MT}(t) \cdot \theta}{\eta_{MT}} + C_{OP-MT} \cdot P_{MT}(t) \cdot \theta \right) + C_{M-MT} \right) \quad (16)$$

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

هزینه‌های تولید انرژی و نگهداری CHP، WT، PV، دیگ بخار و MT به صورت 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) نشان داده شده است. هزینه نگهداری و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در معادلات (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده‌اند. معادلات (۱۷) و (۱۸) محدودیت‌های خرید و فروش انرژی را نشان می‌دهند و معادلات (۱۹) و (۲۰) هزینه نگهداری باطری‌های الکتریکی و حرارتی هستند.

$$C_{Buy}(t) = \sum_{t=1}^T C_{Buy} \cdot P_{Buy} \cdot \theta \quad (17)$$

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

$$C_{Sell}(t) = \sum_{t=1}^T C_{Sell} \cdot P_{Sell} \cdot \theta \quad (18)$$

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

$$C_{ES}(t) = \sum_{t=1}^T C_{OP-ES} \cdot P_{ES} \cdot \theta + C_{M-ES} \quad (19)$$

$$C_{TS}(t) = \sum_{t=1}^T C_{OP-TS} \cdot P_{TS} \cdot \theta + C_{M-TS} \quad (20)$$

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

۴-۲ تابع آلودگی محیط زیست

کاهش آلودگی هوا و محیط زیست یکی از اهداف این پژوهش است. در همین راستا، تلاش بر کاهش گازهای تولید شده توسط منابع آلوده کننده‌ی مورداستفاده در سیستم بوده است. تابع هدف آلودگی و اجزای آن در ادامه آمده‌اند.

$$\left\{ F(Emission) = \sum_{t=1}^T (EM_{CHP}(t) + EM_{MT}(t) + EM_{MG}(t) + EM_{Boiler}(t)) \right. \quad (21)$$

در این رابطه $F(Emission)$ 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.

$$EM_{CHP}(t) = \sum_{t=1}^T EM_{CHP} \cdot EF_{CHP} \cdot \theta \quad (22)$$

$$EM_{Boiler}(t) = \sum_{t=1}^T EM_{Boiler} \cdot EF_{Boiler} \cdot \theta \quad (23)$$

$$EM_{MT}(t) = \sum_{t=1}^T EM_{MT} \cdot EF_{MT} \cdot \theta \quad (24)$$

$$EM_{MG}(t) = \sum_{t=1}^T EM_{MG} \cdot EF_{MG} \cdot \theta \quad (25)$$

که در این روابط تمام پارامترهای با زیروند (t) به معنی در واحد زمان هستند، EF_{CHP} فاکتور آلودگی CHP (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.

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T E_{LD}(t) = \sum_{t=1}^T (P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + \\ P_{CHP}(t) + P_{ES}(t) + P_{Buy}(t) - P_{sell}(t) + P^{dem}(t)) \end{cases} \quad (26)$$

در این معادله $E_{LD}(t)$ تقاضای انرژی الکتریکی در زمان t (kWh) و $P^{dem}(t)$ تقاضای توان الکتریکی در زمان t (kW) است.

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T T_{LD}(t) = \sum_{t=1}^T (P_{Boiler}(t) + P_{CHP}(t) TF_{CHP}(t) + P_{TS}(t)) \end{cases} \quad (27)$$

$$P_{CHP} \leq P_{CHP}^{max} \quad (28)$$

$$P_{Boiler} \leq P_{Boiler}^{max} \quad (29)$$

$$P_{MT} \leq P_{MT}^{max} \quad (30)$$

$$\begin{cases} P_{ES}(t) / \eta_D^E \leq P_{E-dech}^{max} & \text{for } dech((P_{ES}(t) > 0)) \\ -\eta_C^E \cdot P_{ES}(t) \leq P_{E-ch}^{max} & \text{for } ch((P_{ES}(t) < 0)) \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} P_{TS}(t) / \eta_D^T \leq P_{T-dech}^{max} & \text{for } dech((P_{TS}(t) > 0)) \\ -\eta_C^T \cdot P_{TS}(t) \leq P_{T-ch}^{max} & \text{for } ch((P_{TS}(t) < 0)) \end{cases} \quad (32)$$

$$(P_{Buy}(t) \text{ or } P_{Sell}(t)) \leq P_{Line} \quad (33)$$

در این روابط $T_{LD}(t)$ تقاضای بار حرارتی در زمان t (kW_{heat})، P_{CHP}^{max} حداکثر توان CHP (kW)، P_{Boiler}^{max} حداکثر توان بویلر (kW_{heat})، P_{MT}^{max} حداکثر توان میکروتوربین (kW)، P_{Line} حد توان انتقال خط (kW)، η_D^E بازده تخلیه ذخیره‌ساز الکتریکی، P_{E-dech}^{max} حداکثر نرخ تخلیه ذخیره‌سازی الکتریکی، η_C^E بازده شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی، P_{E-ch}^{max} حداکثر نرخ شارژ ذخیره‌سازی الکتریکی، η_D^T بازده تخلیه ذخیره‌ساز حرارتی، P_{T-dech}^{max} حداکثر نرخ تخلیه ذخیره‌سازی حرارتی، η_C^T بازده شارژ ذخیره‌ساز حرارتی و P_{T-ch}^{max} 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.

۳-۴ مدل عدم قطعیت‌ها

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر باعث عدم قطعیت در سیستم خواهد شد. در شرایط جوی مختلف مانند شرایط ابری یا بارانی و همچنین در صورت پوشیده شدن ماژول‌های PV با برف، تولید انرژی توسط این منبع محدود خواهد شد. به همین دلیل باید با دقت به رفع این عدم قطعیت تا حد ممکن پرداخت. می‌توان گفت که یکی از مهم‌ترین کاربردهای منابع تولید انرژی دیگر مانند میکروتوربین و CHP از بین بردن این عدم قطعیت‌ها است. در ادامه به مدل‌سازی انواع عدم قطعیت منابع موجود در ساختمان انرژی صفر پرداخته خواهد شد. مورد بعدی میزان تقاضای بار است. بارهای الکتریکی، به دلیل نامعینی در پیش‌بینی‌پذیری‌شان، با عدم قطعیت همراه هستند؛ بنابراین لحاظ کردن این عدم قطعیت‌ها سبب می‌شود تا طرح ارائه‌شده به نحوی پاسخ‌گوی نیاز موردنیاز در طول دوره برنامه‌ریزی باشد. وارد کردن عدم قطعیت‌ها در برنامه‌ریزی سبب ایجاد تغییر در طرح ارائه‌شده می‌شود. به‌منظور لحاظ نمودن اثر عدم قطعیت در این کار تحقیقاتی از روش تولید سناریو بر اساس روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود؛ بنابراین، در این قسمت روش تولید سناریو و شبیه‌سازی با روش مونت کارلو 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.

۴-۳-۱ عدم قطعیت در بار الکتریکی

روش‌های مونت کارلو یک دسته از الگوریتم‌های محاسباتی هستند که مبتنی بر تکرار تصادفی نمونه‌برداری برای محاسبه نتایج هستند. روش‌های مونت کارلو به‌طور کلی 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 مونت کارلو در واقع یکی از جامع‌ترین ابزارها برای ارزیابی مطالعات دارای عدم قطعیت هستند. الگوی کلی روش‌های مونت کارلو 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 \mathcal{X} باشد. لذا مقدار قابل انتظار برای تابع هدف $F(X)$ بر مجموعه \mathcal{X} عبارتست از:

$$E(F) = \sum_{x \in \mathcal{X}} F(x)P(x) \quad (36)$$

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

$$\hat{E}(F) = \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^{NS} F(x_i) \quad (37)$$

که در رابطه فوق، NS تعداد نمونه‌ها، x_i مقدار i امین نمونه و $F(x_i)$ نتیجه تست برای i امین نمونه است. از آنجایی که 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:

$$V(\hat{E}(F)) = \frac{V(F)}{NS} \quad (38)$$

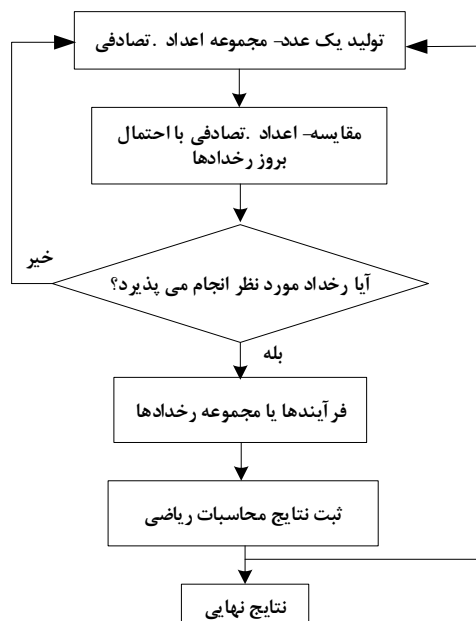
که، $V(F)$ واریانس تابع F است و مطابق رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$\hat{V}(F) = \frac{1}{NS-1} \sum_{i=1}^{NS} (F(x_i) - \hat{E}(x_i))^2 \quad (39)$$

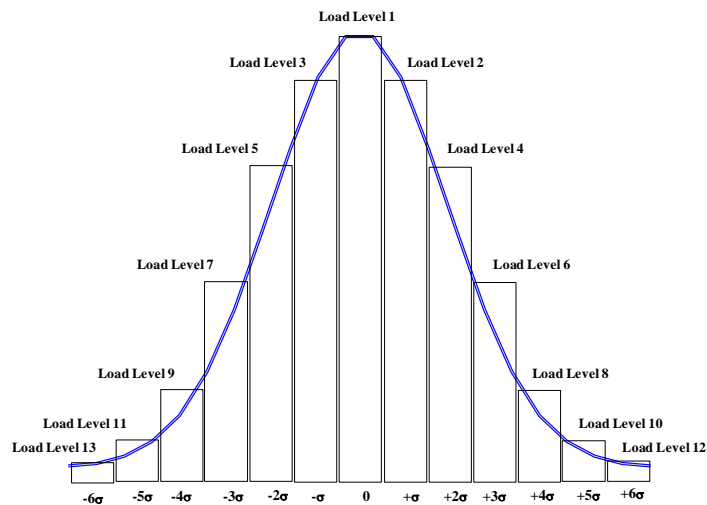
از این رو، میزان خطا در شبیه‌سازی مونت کارلو، β مطابق رابطه‌ی (۴۰) محاسبه می‌شود. فلوجارت کلی الگوریتم‌های مونت کارلو در شکل (۳) آمده است.

$$\beta = \frac{\sqrt{\frac{V(F)}{NS}}}{\hat{E}(F)} \quad (40)$$

همان‌طور که در [۱۹] آمده است، به‌طور کلی عدم قطعیت‌های معین در سیستم قدرت با توابع توزیع احتمالاتی تخمین زده می‌شوند. به‌عنوان مثال بارها و خروجی منابع تجدید پذیر انرژی در سیستم قدرت با توابع توزیع احتمالی نرمال تخمین زده می‌شوند [۲۰]. قابل ذکر 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. از آنجایی که تابع توزیع نرمال یک تابع پیوسته است بنابراین، احتمال وقوع هر نقطه بار را نشان نمی‌دهد 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 تقریب زنی، هر چه پله‌های لحاظ شده برای تقریب، کوچک‌تر باشند، خطای تقریب کمتر است. به‌عنوان مثال، تابع نرمال فوق و تقریب آن با سیزده پله در شکل (۴) نشان داده شده 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. از این‌رو، توابع نامعین موجود در مسئله را می‌توان با یک معادله مطابق رابطه زیر بیان نمود.



شکل (۳): فلوچارت الگوریتم مونت کارلو



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

$$P = \begin{cases} P_1 & \text{Load} = I_1 \\ P_2 & \text{Load} = I_2 \\ \vdots & \\ P_n & \text{Load} = I_n \end{cases} \quad (41)$$

بعد از تعریف عدم قطعیت‌های 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. به‌عنوان مثال 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 قابل ذکر است که در این مقاله خودروهایی الکتریکی در نقش ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی لحاظ شده‌اند که فیود مربوطه در رابطه‌های ۳ تا ۱۰ آمده است و نحوه شارژ و دشارژ آنها توسط الگوریتم برنامه‌نویسی تعیین می‌شود.

۴-۳-۲ مدل عدم قطعیت باد

یکی از مهم‌ترین توابعی که برای تخمین سرعت باد در یک منطقه به کار می‌رود تابع توزیع ویبل^۴ است که تابع چگالی احتمال آن به صورت زیر است [۲۲].

$$f_U(U) = \begin{cases} 0 & U < 0 \\ \frac{K}{C} \left(\frac{U}{C}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{U}{C}\right)^K} & U \geq 0 \end{cases} \quad (42)$$

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.

$$\mu_U = C \Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) \quad (43)$$

$$\sigma_U^2 = C^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{K}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) \right]^2 \right] \quad (44)$$

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

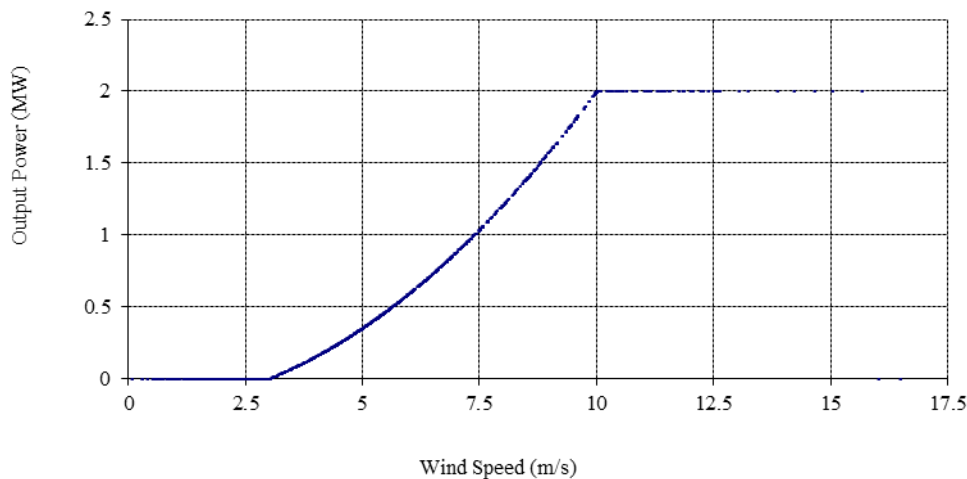
$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (45)$$

با جایگزینی $K=2$ ، تابع توزیع رایلی^۵ حاصل می‌شود؛ بنابراین، رابطه (۴۳) به صورت رابطه زیر در می‌آید.

$$\mu_U = \frac{\sqrt{\pi}}{2} C \quad (46)$$

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 تشکیل شده است می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} P_R |_{WF} &= n P_R |_{WT} \\ U_{CI} |_{WF} &= U_{CI} |_{WT} \\ U_R |_{WF} &= U_R |_{WT} \\ U_{CO} |_{WF} &= U_{CO} |_{WT} \end{aligned} \quad (47)$$



شکل (۵): تابع توان خروجی یک توربین بادی

۳-۳-۴ مدل عدم قطعیت در تولید توسط PV

برای مدل‌سازی عدم قطعیت سیستم فتوولتاییک دقیقاً مطابق رویه به کاررفته 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:

$$\text{betapdf}(x, a, b) = \frac{1}{B(a, b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1} \quad (48)$$

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

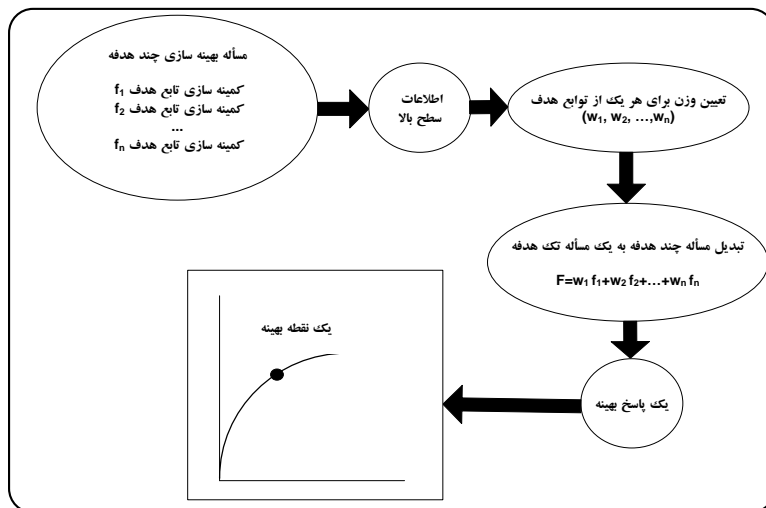
$$B(a, b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} \quad (49)$$

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

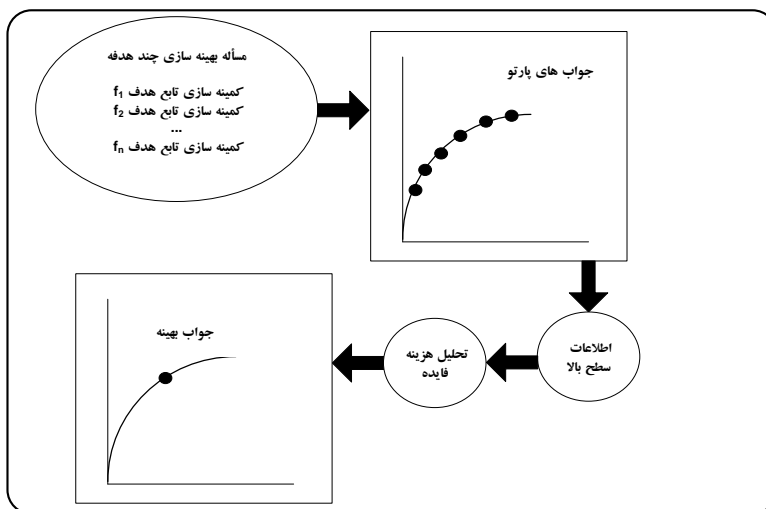
۵- بهینه‌سازی چندهدفه

در این مقاله جهت حل مسئله چندهدفه با رویکرد پسینی^۶ به موضوع پرداخته شده است. این رویکرد نسبت به روش حل پیشینی^۷ مزایای فراوانی دارد. در روش‌های پیشینی، مطابق الگوریتم شکل (۱)، ابتدا برنامه‌ریز سیستم اهمیت هر یک از توابع هدف را با توجه به 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 برنامه ریز سیستم ممکن است نتواند وزن های مناسبی برای هر یک از توابع هدف پیدا کند که در این صورت ممکن است جواب های به دست آمده قابل اطمینان نباشند. در رویکردهای پسینی، توسط اطلاعات سطح بالا جواب های پارتو مشخص شده و برنامه ریز سیستم این قابلیت را دارد که باتوجه به معیارهای خود جواب بهینه را از بین جواب های پارتو تعیین نماید [۱۷]. در شکل ۲ نحوه به دست آوردن جواب بهینه در رویکردهای پسینی آمده است.



شکل (۱): رویکرد پیش از حل مسائل چندهدفه

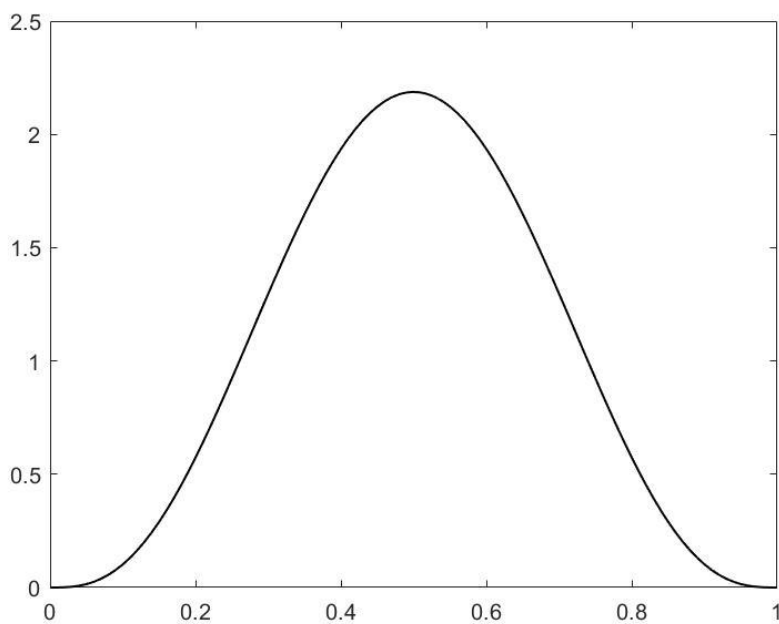


شکل (۲): رویکرد پس از حل مسائل چندهدفه

۶- نتایج شبیه سازی

۶-۱ شبیه سازی بار الکتریکی

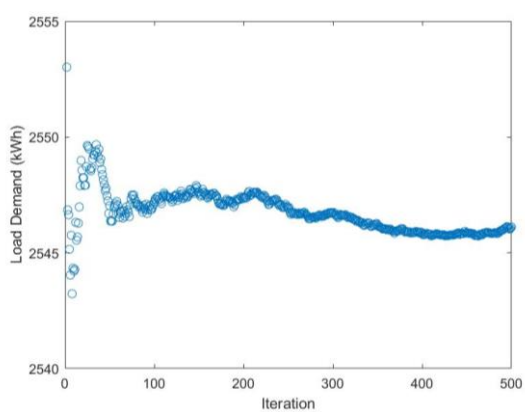
بیه سازی مربوط به پروفیل بار در چهار دوره ی ۶ ساعته صورت گرفته است. نتایج حاصل از تخمین و پیش بینی بار الکتریکی منطبق بر الگوریتم مونت کارلو در شکل های (۷)-الف تا د برای هر دوره ی زمانی آمده است. مقدار نهایی بار الکتریکی و بار حرارتی در جدول (۲) آمده است. در فصل چهارم به بررسی کامل این موارد پرداخته شد.



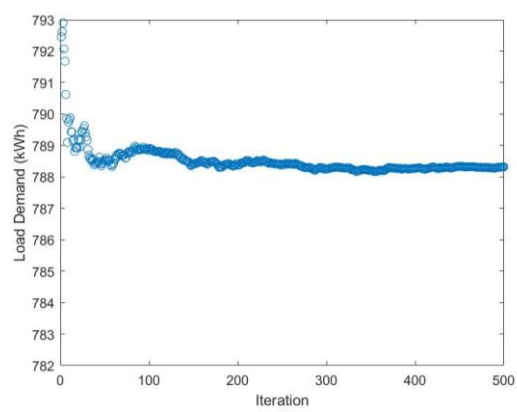
شکل (۶): تابع چگالی احتمال بتا به ازای پارامترهای $a=b=4$

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

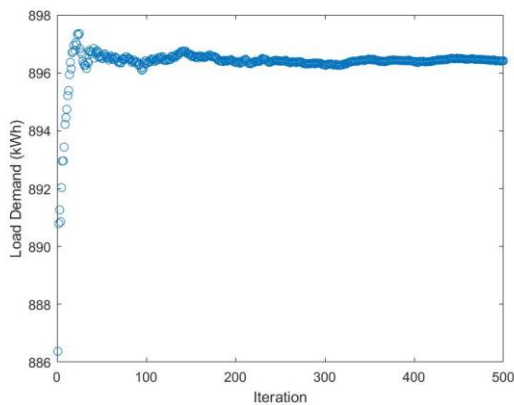
بازه زمانی	بار الکتریکی (kWh)	بار حرارتی (kW _{heat})
۱	۷۸۰/۳۲	۱۸/۰۳۶
۲	۲۵۴۶/۱۲	۱۴/۵۳۳
۳	۲۵۰۶/۱۲	۱۰/۸۳۸
۴	۸۹۶/۴۲	۰/۰



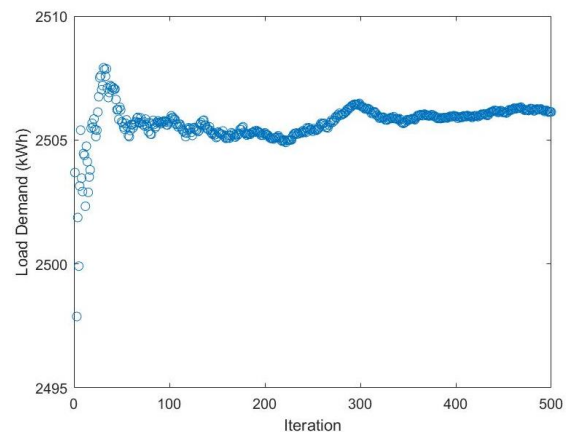
(ب)



(الف)



(د)

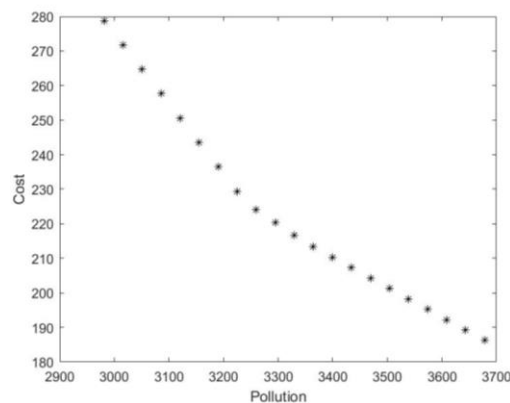


(ج)

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

۲-۶ 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.



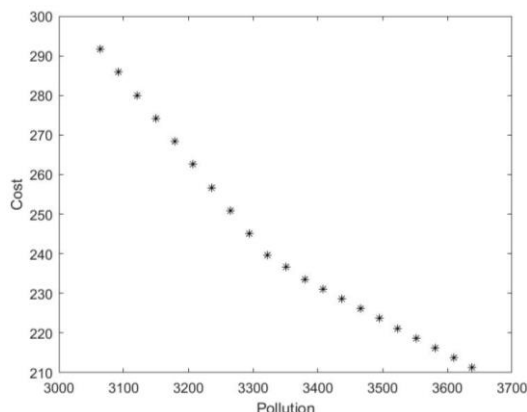
شکل (۸): مجموعه جواب‌های شبه‌بهینه در سناریو اول

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 نشان دادن اهمیت منابع تجدیدپذیر انرژی شبیه‌سازی در حضور آنها انجام شد و دیده شد که در این حالت هم هزینه و هم آلودگی کاهش یافته 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.



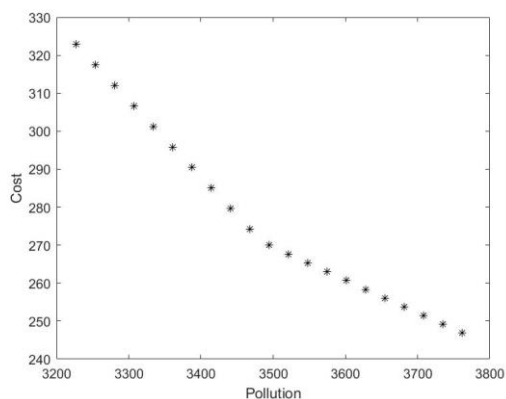
شکل (۹): مجموعه جواب‌های شبه‌بهینه در سناریو دوم

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

باتوجه به عدم قطعیت 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.



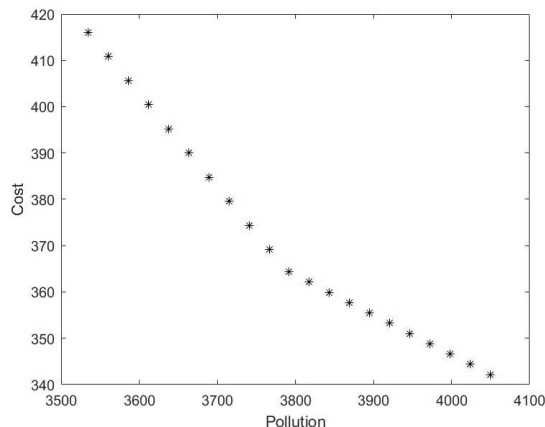
شکل (۱۰): مجموعه جواب‌های شبه‌بهینه در سناریو سوم

جدول (۵): خروجی منابع به‌کاررفته در سناریو سوم

	CHP	MT	PV	Wind	Electrical storage 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 فتوولتائیک انجام شده است و با توجه به 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 به کاررفته 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 چرا که تمام آن‌ها در جبهه‌ی پارتو قرار دارند. بنابراین، در صورت نیاز به هزینه‌ی پایین‌تر، با آلودگی بیشتر می‌توان به هدف رسید.

۷- نتیجه‌گیری

ساختمان‌های انرژی صفر بیشترین اثربخشی و بهره‌وری را در برخی سازه‌ها و کاربردهای خاص دارد به عنوان مثال پایگاه‌ها و پادگان‌های نظامی که در مناطق دورافتاده بوده و دسترسی به شبکه برق سراسری را ندارند قابلیت‌های چشم‌گیری برای آن واحد و ساختمان نظامی به همراه خواهد داشت مانند: نیروهای نظامی دیگر به شبکه برق یا سوخت‌های فسیلی وابسته نیستند، سیستم‌های تجدیدپذیر تولید انرژی (مثل پنل خورشیدی) گرمای کمتری تولید می‌کنند، کاهش قابل توجه در شناسایی حرارتی توسط دشمن، امکان طراحی سازه‌های متحرک صفر انرژی برای عملیات‌های کوتاه‌مدت و مناسب برای پایگاه‌هایی که در نقاط دورافتاده مثل کوهستان یا بیابان مستقر هستند.

در این مقاله به برنامه‌ریزی ساختمان انرژی صفر با دو هدف برنامه‌ریزی و استفاده از منابع متنوع تولید پراکنده به جهت رفع نیاز در تأمین انرژی در زمان بحران کشور و رعایت اصول پدافند غیر عامل که در نظام آنارشیک بین‌المللی توجه ویژه‌ای به آن دارند و می‌توان در ساختمان‌های مهم نظامی و سیاسی کشور استفاده و توجه ویژه‌ای به آن داشت و دوم کاهش هزینه و آلودگی زیست محیطی پرداخته شده است. به جهت باز بودن دست بهره‌بردار سیستم و در راستای تنوع بخشی به منابع تأمین

کننده‌ی 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 می‌توان این مطالعات را به منظور برنامه ریزی و اجرا در یک ساختمان انرژی صفر در نظر گرفت و آن را در ساختمان‌های سیاسی مهم کشور و ستاد‌های نیروهای مسلح به مرحله اجرا درآورد.

References

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 vehicle-to-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.etrans.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. Asgarpour 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. Erdinc, 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 ملی 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-denhoek und Ruprecht*, p. 64, 1926.
- [16] H. Glauert, "Windmills and fans," *Aerodynamic theory*, vol. 3, 1935.
- [17] P. Maghoul, S. H. Hosseini, M. O. Buygi, and M. Shahidepour, "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)

زیر نویس ها:

¹Demand

² Photovoltaic

³ Worst Case

⁴ Weibull Distribution Function

⁵ Rayleigh Distribution Function

⁶ Posteriori approaches

⁷ Priori approaches