





| | | | |
|--|--|--|--|
| ISSN: 2821-157X | | https://www.jasd.khadu.ir | |
|  | | Journal of Aerospace Defense Volume 4, Issue 4 Winter2025 P.P 21-59 | |
| | |  | |
| Research Paper;  | | | |
| Forecasting and planning the load of a building by providing a switching power supply model and the presence of island-based distributed generation resources connected to the power grid Reza Sepahvand ^{1*} , Ali Mehrabi ² | | | |
| 1 Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Flight, Imam Ali University, Tehran, Iran (sepahvand@iamu.ac.ir, reza_sepahvand@yahoo.com) 2 Assistant Professor, Helicopter Maintenance and Repair Engineering Department, Faculty of Engineering and Flight, Imam Ali University, Tehran, Iran. (Alimehrabi110@gmail.com) | | | |
| Article Information | | Abstract | |
| Accepted: 2026/02/24 Received: 2025/06/28 | | Load forecasting and energy management in self-sufficient buildings have become increasingly important due to the growing demand for sustainable, reliable, and resilient energy systems. This paper presents a comprehensive framework for forecasting and optimal energy scheduling of a building equipped with distributed generation resources capable of supplying its energy demand independently from the utility grid while maintaining the capability of power exchange with the upstream network when required. To improve system reliability and operational flexibility, a combination of renewable and non-renewable energy resources, including photovoltaic systems, wind turbines, microturbines, combined heat and power (CHP) units, boilers, and electrical and thermal energy storage systems, is considered. To achieve more accurate energy planning, uncertainties associated with electrical load demand, wind speed, and solar irradiance are modeled using Monte Carlo simulation, Weibull probability distribution, and Beta probability distribution, respectively. The energy management problem is formulated as a multi-objective optimization model with the simultaneous objectives of minimizing operating costs and environmental emissions while satisfying technical and operational constraints. The main contribution of this study is the development of an integrated framework that simultaneously considers renewable generation uncertainties, grid-connected and islanded operating modes, and the implementation of a high step-up switching power converter based on an enhanced SEPIC topology. The proposed converter offers high voltage gain, reduced component count, lower current stress on switches and diodes, improved efficiency, and enhanced reliability, thereby supporting passive defense requirements and increasing the resilience of the building energy system. Simulation results under four different operating scenarios demonstrate the effectiveness of the proposed approach in supplying building loads under varying operating conditions and uncertainty levels. The proposed framework reduces dependency on the utility grid, improves economic and environmental performance, enhances energy utilization efficiency, and increases the overall reliability and resilience of the building energy system. | |
| Keywords: <i>Distributed generation, scheduling, switching, multi-objective optimization, uncertainty.</i> | | | |
| Corresponding Author: Reza Sepahvand , Email: sepahvand@iamu.ac.ir | | | |
| Reza Sepahvand, Ali Mehrabi, (2026). Forecasting and planning the load of a building by presenting a switching power supply model and the presence of islanded distributed generation sources connected to the power grid, Volume 4 (No.4), pages 21-59. | | | |



فصلنامه علمی دفاع هوافضایی

دوره ۴ شماره ۴
زمستان ۱۴۰۴
صفحات ۵۹ - ۲۱



مقاله پژوهش 

پیش بینی و برنامه ریزی بار یک ساختمان با ارائه مدل منبع تغذیه سوئیچینگ و حضور

منابع تولید پراکنده به صورت جزیره‌ای و متصل به شبکه برق

*رضا سپه‌وند^۱، علی مهرابی^۲

۱. استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی نگهداری و تعمیر بالگرد، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه امام علی، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

پیش‌بینی و برنامه‌ریزی انرژی در ساختمان‌های خودتأمین به دلیل افزایش تقاضای انرژی، توسعه منابع تولید پراکنده و ضرورت ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی، به یکی از موضوعات مهم در حوزه مدیریت انرژی تبدیل شده است. در این پژوهش، مدلی جامع برای پیش‌بینی و برنامه‌ریزی بار یک ساختمان مجهز به منابع تولید پراکنده ارائه شده است که قابلیت بهره‌برداری مستقل از شبکه سراسری و همچنین تبادل توان با شبکه را در شرایط موردنیاز داراست. به منظور افزایش قابلیت اطمینان و تنوع بخشی به منابع تأمین انرژی، از ترکیبی از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر شامل سامانه فتوولتائیک، توربین بادی، میکروتوربین، واحد تولید همزمان برق و حرارت، بویلر و سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی استفاده شده است. به منظور دستیابی به برنامه‌ریزی دقیق تر، عدم قطعیت بار الکتریکی، سرعت باد و تابش خورشیدی به ترتیب با استفاده از الگوریتم مونت کارلو، تابع توزیع ویبل و تابع توزیع بتا مدل‌سازی شده است. همچنین مسئله مدیریت انرژی به صورت یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف کمینه‌سازی هزینه تأمین انرژی و میزان انتشار آلاینده‌ها فرموله و حل شده است. نوآوری اصلی پژوهش در ارائه یک چارچوب یکپارچه برای مدیریت انرژی ساختمان با در نظر گرفتن همزمان عدم قطعیت منابع، قابلیت عملکرد جزیره‌ای و متصل به شبکه و به کارگیری یک مبدل سوئیچینگ با بهره و لتاژ بالا مبتنی بر ساختار بهبودیافته SEPIC است. مبدل پیشنهادی با تعداد قطعات کمتر، بازدهی بالا، تنش جریان پایین تر روی کلیدها و دیودها و قابلیت اطمینان بیشتر، عملکرد فنی سیستم را بهبود می‌بخشد. نتایج شبیه‌سازی در چهار سناریوی مختلف نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی توانایی مناسبی در تأمین بار، کاهش وابستگی به شبکه، بهبود شاخص‌های اقتصادی و زیست محیطی و افزایش بهره‌وری و تاب‌آوری سیستم انرژی ساختمان دارد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۲/۰۵

کلیدواژه‌ها:

تولید پراکنده، برنامه ریزی، سوئیچینگ، بهینه‌سازی چندهدفه، عدم قطعیت.

نویسنده مسئول:

رضا سپه‌وند

ایمیل:

sepahvand@iamu.ac.ir

رضا سپه‌وند، علی مهرابی، (۱۴۰۵). پیش‌بینی و برنامه‌ریزی بار یک ساختمان با ارائه مدل منبع تغذیه سوئیچینگ و حضور منابع تولید پراکنده به صورت جزیره‌ای و متصل به شبکه برق، دوره ۴ (شماره ۴)، صفحه ۵۹ - ۲۱.

۱- مقدمه

پیش بینی و برنامه ریزی 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 وسیله منابع فسیلی است. عنوان شده است که تأمین انرژی ساختمان عامل انتشار گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر است که باتوجه به مواردی چون گرمایش جهانی به علت افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، تغییرات اقلیم و ... چنین اعدادی به هیچ‌وجه قابل توجیه 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 [۳].

۱- 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 [۱۱]. مجموعه‌ای مسکونی در نظر گرفته شده است که متصل به شبکه برق هستند. تمام این منازل دارای منابع تولید تجدیدپذیر و باتری هستند. هدف در این پژوهش کاهش هزینه‌ی اجرای چنین مجموعه‌ای است. در این مقاله جهت حل مشکلات عدم قطعیت، عدم توازن تولید و مصرف در ساختمان‌های صفر انرژی و با رویکرد در نظر گرفتن باتری (ذخیره سازها)، 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 [۴]. یک ساختمان صفر انرژی با منبع انرژی PV و در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌ساز را

معرفی کرده است که باطری ها نیز در آن در نظر گرفته شده است. مطابق گفته نویسندگان، هدف از این پژوهش برقراری هماهنگی میان سیستم ذخیره ساز انرژی، منبع PV و ایستگاه شارژ خودرو برقی به منظور کاهش پیک بار و تغذیه ی بارهای محلی عنوان شده است [۵]. 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 اصلی ترین چالش ها 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 [۶]. به بررسی یک ساختمان تجاری انرژی صفر در سانفرانسیسکو در ایالات متحده ی امریکا پرداخته است. نویسندگان معتقد است که مطالعات ریزشبکه^۱ در مقیاس این نوع ساختمان ها 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 [۷]. به بررسی نسبتاً جامعی در مورد بارها و منابع یک ساختمان انرژی صفر می پردازد. در این مرجع عنوان شده است که بدون ایجاد تغییر در ساختار یا سخت افزار یک ساختمان می توان بین ۲۰ تا ۳۰٪ بار مصرفی آن را کاهش داد. این مرجع نکته ی کلیدی بهینه سازی را هماهنگی میان منابع تولیدکننده ی انرژی و بارهای مصرفی می داند [۸]. [۹]. طراحی و در نظر گرفتن مقدار بهینه ی منبع تولید باد و ذخیره ساز (باتری) تمرکز کرده اند. در این مرجع مطالعاتی در حوزه ی هزینه های انرژی نیز انجام شده است و سه عامل هزینه ی قبض پرداختی، سرعت باد و مصرف بار الکتریکی به عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شده اند [۱۰]. سیستم های تولید ترکیبی راه چاره ای برای کاهش اثرات مخرب زیست محیطی روش های رایج تأمین انرژی معرفی شده است و استفاده از این نوع سیستم در درازمدت را عاملی در جهت صرفه جویی در هزینه و افزایش قابلیت اطمینان شبکه دانسته است. در این سیستم از توربین بادی، ماژول های PVii و باتری به عنوان ذخیره ساز 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 پیش بینی 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 است [۱۲]. در منابع تغذیه سوئیچینگ که مبتنی بر تحلیل های اخیر روی مراکز داده زمان خاموشی این مراکز به علت افزایش توان تغذیه ی خروجی توسط منابع تغذیه بدون وقفه (UPS) زیاد شده است. به عنوان یک راه حل در مورد اضافه بار UPS ها یک برنامه ریزی توزیع برق توسعه یافته (PDM) را ارائه

¹ Microgrid

می‌کند که مصرف برق DC را با اعمال محدودیت روی سرورهای در حال اجرا بر اساس تابع هزینه کمینه‌سازی توان UPS محدود می‌کند. روش PDM پیشنهادی توان DC مصرفی هر UPS را با روش تسهیم زمان و مقیاس‌بندی دینامیک فرکانس را کنترل می‌کند، در نتیجه مشکل اضافه‌بار UPS را حل می‌کند که این موضوع باعث کاهش تعداد از دسترس خارج شدن UPS ها می‌شود [۲۵].

۲- پیش بینی بار؛ 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].

۱-۲ 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. به‌طور 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 [۱]. (حاصل ضرب تعداد در توان نامی)

جدول (۱): انواع بارهای مصرفی [۱].

| 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 پیک‌بار محاسبه شدند. در نظر گرفتن جمع این اعداد برای در نظر گرفتن بدترین حالت 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 پیچ‌گوشتی 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. 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 [۱]. 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.

مصارف روشنایی مهم‌ترین نوع مصرف برق در بخش خانگی است. یک شبانه‌روز به چهار بازه‌ی زمانی شش‌ساعته تقسیم شده است. هر بازه‌ی زمانی بخش خاصی از روز است. بازه‌ی زمانی اول به ساعت ۰۰:۰۰ تا ساعت ۰۶:۰۰ صبح اختصاص یافته است. در این ساعات تنها بارهای ضروری که امکان خاموش نمودن آن‌ها وجود ندارد روشن خواهند بود. همچنین، در طی این ساعات، ساختمان با حداقل تعداد پرسنل به کار خود ادامه خواهد داد که این پرسنل شامل نگهبانان یا افراد معدودی در اتاق سرور و مخابرات می‌شوند. در بازه‌ی ساعت ۰۶:۰۰ صبح تا ۱۲:۰۰ ظهر، کارکنان در محل کار خود حاضر می‌شوند. نور بیرون از ساختمان در ساعات اولیه هنوز به میزان لازم و استاندارد برای شروع به کار نرسیده است و لامپ‌ها و چراغ‌ها باید در این اوقات روشن باشند. از طرفی در بهار، در این ساعات هوا خنک‌تر است و نیاز چندانی به روشن کردن سیستم خنک‌کننده وجود ندارد. بازه‌ی ساعت ۱۲:۰۰ ظهر تا ۱۸:۰۰ غروب بازه‌ای است که کارمندان گرمای بیشتری را تجربه می‌کنند و به‌احتمال زیاد، به‌ویژه در تابستان، به استفاده از کولر رو می‌آورند. از طرفی، نیازی به استفاده از برخی لامپ‌ها در این ساعات نیست. ماشین‌های ظرف‌شویی صنعتی در این بازه باید روشن شوند تا ظروف غذای نهار را شستشو دهند. در اواخر این بازه، کارمندان محل کار خود را ترک می‌کنند. در بازه‌ی زمانی ساعت ۱۸:۰۰ غروب تا ۰۰:۰۰ بامداد، صرفاً نیروهای محدودی در ساختمان باقی می‌مانند و برخی از نیروهای خدماتی جهت نظافت تجهیزاتی مانند جاروبرقی و ... را روشن می‌کنند. استفاده از لباسشویی برای پرسنل نیز در این بازه پیش‌بینی شده است [۱] و [۲۳].

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

| نوع مصرف | بازه زمانی | 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 | | ۱۰۷۴۳،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 عدم قطعیت 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 در این بین برای توربین اتفاق می‌افتد صرف نظر کرد. تحلیل آیرودینامیکی توربین بادی توسط Betz [۱۵] و Glauert [۱۶] و توان در دسترس توسط باد مطابق رابطه ۱ است.

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

که در رابطه‌ی 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 ماژول‌های خورشیدی یا همان PV است. توان خروجی $P_{PV(t)}$ بر اساس درجه‌ی حرارت ماژول و میزان تابش خورشید است.

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

در این رابطه، $N_{PV,s}$ تعداد ماژول‌های سری در یک آرایه، $N_{PV,p}$ تعداد ماژول‌های موازی در یک آرایه، T_0 دمای مرجع سلول در شرایط تست استاندارد ($25^\circ C$)، $T(t)$ 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

باتوجه به نیاز به ذخیره‌سازی و در راستای تنوع بخشی به منابع تأمین کننده‌ی 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.

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

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

$$E_S^{\min} \leq E_S(t) \leq E_S^{\max} \quad (۴)$$

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

$$\begin{cases} E_S^{\min} - E_S(0) \leq \sum_{k=1}^t P_{ES}(k) \leq E_S^{\max} - E_S(0) \\ (\forall t = 1, 2, \dots, T) \end{cases} \quad (۵)$$

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

$$E_S(0) = E_S(T) \quad (۶)$$

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.

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

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.

$$TE_S^{\min} \leq TE_S(t) \leq TE_S^{\max} \quad (۸)$$

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

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

$$TE_S(0) = TE_S(T) \quad (۱۰)$$

چند قید لحاظ شده به این صورت است که مقدار ابتدایی و نهایی انرژی ذخیره‌شده در 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 تعریف شده 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 $F(\text{Cost})$ هزینه 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 (\$)، $C_{MT}(t)$ هزینه 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 (heatkW) و C_{M-TS} هزینه تعمیر و نگهداری TS (\$) است.

۵- تابع آلودگی محیط‌زیست

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 مورد استفاده در سیستم بوده است. تابع هدف آلودگی و اجزای آن در ادامه آمده‌اند.

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

در این رابطه $F(\text{Emission})$ 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_{MT} فاکتور آلودگی MT (kg/Mwah)، EF_{Boiler} فاکتور آلودگی بویلر (kg/Mwah) و EF_{MG} فاکتور آلودگی شبکه‌ی اصلی (kg/Mwah) است.

معادلات (۲۲-۲۵) به ترتیب نشان دهنده آلودگی تولید شده توسط CHP، دیگ بخار، MT و آلودگی متناظر با انرژی خریداری شده است. قیود حاکم بر مسئله و قیود حاکم بر اجزای تولیدی و مصرفی ساختمان ارائه دهنده 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.

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

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

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

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

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

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

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

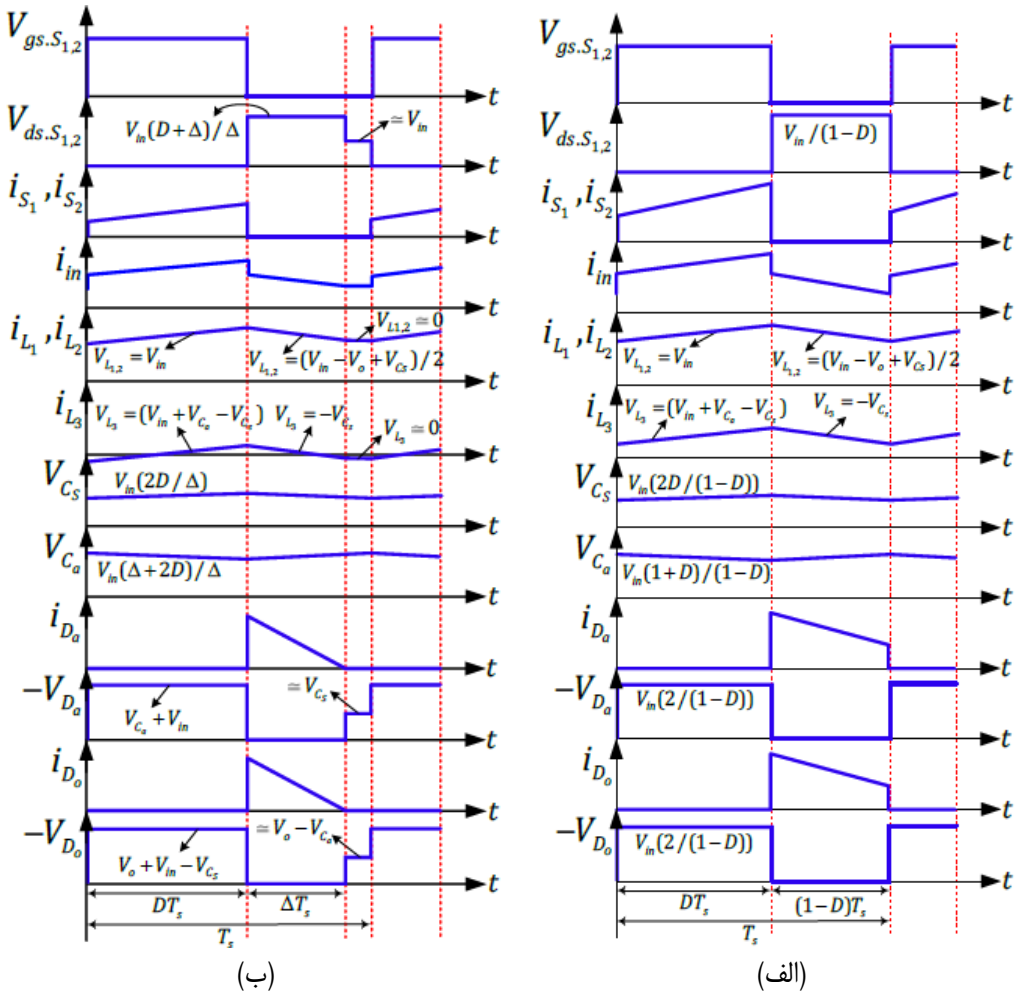
در این روابط $T_{LD}(t)$ تقاضای بار حرارتی در زمان t (kW_{heat})، P_{CHP}^{\max} حداکثر توان CHP (kW)، P_{Boiler}^{\max} حداکثر توان بویلر (kW_{heat})، P_{MT}^{\max} حداکثر توان میکروتوربین (kW)، P_{Line} حد توان انتقال خط (kW)، η_D^E بازده تخلیه ذخیره‌ساز الکتریکی، P_{E-dech}^{\max} حداکثر نرخ تخلیه 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. (۲۸-۳۰) 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.

۶- مدل منبع تغذیه‌ی سوئیچینگ

یکی از اجزای موجود در سیستم ساختمان انرژی صفر طراحی شده، منبع تغذیه‌ی سوئیچینگ است. این مبدل‌ها که از انواع مبدل الکترونیک قدرت هستند، کاربرد وسیعی در یک ساختمان اداری دارند. اصولاً در هر کجا که تغییر سطح یا نوع ولتاژ موردنظر باشد می‌توان از مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده نمود. علت طراحی این نوع مبدل در یک ساختمان، بهینه‌سازی مبدل‌های موجود و افزایش قابلیت اطمینان باتوجه‌به بومی‌سازی آن و اصول پدافند غیرعامل است. مبدل به‌کاررفته در این طرح باهدف سبک بودن، برخورداری از بازدهی بالاتر و بهره‌ی ولتاژ بیشتر است. در ادامه به طراحی این مبدل پرداخته خواهد شد.

۱-۶ اصول عملکرد مبدل پیشنهادی

مبدل پیشنهادی با بهره‌ی افزاینده‌ی بالا و بدون سلف تزویج پیشنهادی در شکل ۵-۱۱ نمایش داده‌شده است. باتوجه‌به این شکل، مبدل بر اساس توپولوژی SEPIC است و دو کلید S1 و S2، دو دیود Do و Da، سه سلف غیرتزویج L1، L2 و L3 و سه خازن Cs، Ca و Co را شامل می‌شود. بنابراین، صورت اصلاح شده‌ی مبدل SEPIC با اضافه کردن چهار عنصر شامل



شکل (۲) شکل موج‌های کلیدی مبدل پیشنهادی (الف) عملکرد در CCM (ب) عملکرد در DCM

حالت ۱: $(0 < t < DT_s)$: در شروع این حالت، کلیدهای S1 و S2 هم‌زمان روشن می‌شوند. جهت شارش جریان در شکل (۲) الف نمایش داده شده است. دیودهای Da و Do خاموش هستند و انرژی ذخیره شده به سلف‌های L2 و L1 منتقل می‌شوند. ولتاژ ورودی V_{in} تا هنگامی که دو سلف L1 و L2 موازی هستند روی آن دو می‌افتد. انرژی ذخیره شده در خازن خروجی Co در بار تخلیه می‌شود. ولتاژ روی L1 و L2 و ولتاژ دو سر سلف L3 برابر خواهد بود با:

$$V_{L_1} = V_{L_2} = V_{in} \tag{۳۵}$$

$$V_{L_3} = V_{C_a} - V_{C_s} + V_{in} \tag{۳۶}$$

حالت دو $(DT_s < t < T_s)$: در این حالت، کلیدهای S1 و S2 خاموش هستند و دیودهای Da و Do روشن هستند. جریان در این حالت در مسیرهای نشان داده شده در شکل (۲) ب شارش می‌کند. انرژی منبع و سلف‌های ورودی L1 و L2 سری هستند و از طریق دیود Do به بار خروجی منتقل خواهند

شد نیز خازن کمکی Ca و دیود Do در این امر مشارکت خواهند داشت. همچنین، انرژی ذخیره شده در سلف L3 از طریق دیود Do به خروجی انتقال پیدا می‌کند. جریان و نسبت دور سلف‌های خروجی با هم برابرند؛ بنابراین ولتاژ دو سر L2 و L1 در این حالت از معادله‌ی (۳۷) به دست می‌آید.

$$V_{L_1} = V_{L_2} = \frac{V_{in} - V_o + V_{Cs}}{2} \quad (37)$$

همچنین ولتاژ دو سر سلف L3 برابر است با:

$$V_{L_3} = -V_{Cs} \quad (38)$$

قانون ولتاژ کیرشهف در مسیر شامل V_{in}, L_1, L_3, C_s و C_s به شکل زیر است:

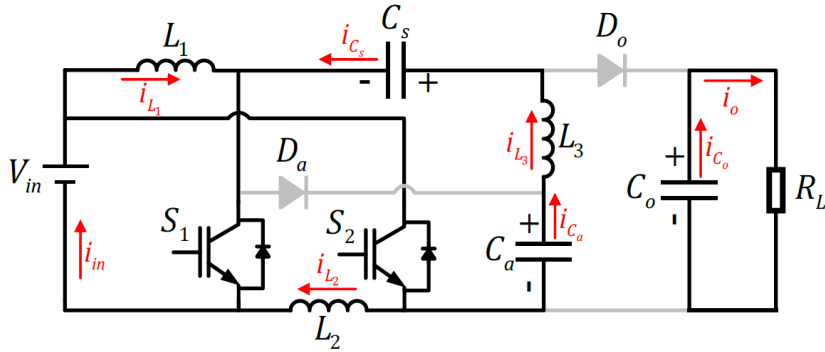
$$-V_{in} + V_{L_1} - V_{Cs} - V_{L_3} + V_{Ca} + V_{L_2} = 0 \quad (39)$$

با استفاده از میانگین این ولتاژها:

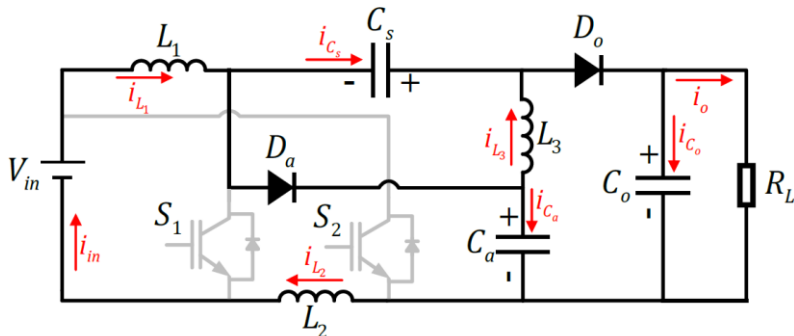
$$V_{in} + 0 - V_{Cs} - 0 + V_{Ca} + 0 = 0 \quad (40)$$

پس از ساده‌سازی:

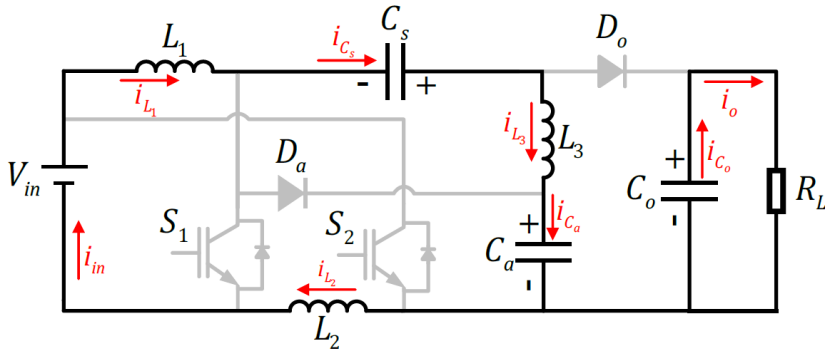
$$V_{in} = V_{Ca} - V_{Cs} \quad (41)$$



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۳) مسیر عبور جریان در مبدل پیشنهادی در یک دوره‌ی کلیدزنی (الف) مد ۱ (ب) مد ۲ و (ج) مد ۳ برای عملکرد در حالت DCM

با اعمال اصل تعادل ولت - ثانیه روی سلف‌های L_1 ، L_2 و L_3 و با استفاده از معادلات (۳۶) تا (۳۸) خواهیم داشت:

$$\frac{1}{T_s} \left(\int_0^{DT_s} V_{in} dt + \int_{DT_s}^{T_s} \frac{(V_{in} - V_o + V_{Cs})}{2} dt \right) = 0 \quad (42)$$

$$\frac{1}{T_s} \left(\int_0^{DT_s} (V_{in} + V_{Ca} - V_{Cs}) dt + \int_{DT_s}^{T_s} -V_{Cs} dt \right) = 0 \quad (43)$$

چون C_a و C_s به اندازه‌ی کافی بزرگ هستند، $V_{Ca} - V_{Cs}$ در مقدار میانگین V_{in} ثابت باقی می‌ماند؛ بنابراین، باتوجه به (۴۱) و (۴۳) مقدار میانگین C_a و C_s می‌تواند به ترتیب، بر اساس (۴۴) و (۴۵) به دست آید:

$$V_{Cs} = \frac{2D}{1-D} V_{in} \quad (44)$$

$$V_{Ca} = \frac{1+D}{1-D} V_{in} \quad (45)$$

نهایتاً با استفاده از (۴۲) و (۴۴)، بهره‌ی ولتاژ انتقالی M در حالت عملکردی پیوسته به صورت زیر به دست می‌آید:

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{3D+1}{1-D} \quad (46)$$

جریان ورودی باتوجه به رابطه‌ی (۴۷) محاسبه شده است. اما در شرایط واقعی، اجزا ایدئال نیستند و معادله‌ی (۴۷) با استفاده از بازدهی مبدل به دست آمده است.

$$I_{in} = \frac{3D+1}{1-D} I_o \quad (47)$$

بار خازن Co در حین حالت دوم افزایش پیدا می کند ($Q_{C_o^+}$) و در حالت اول کم می شود ($Q_{C_o^-}$). به دست می آوریم:

$$Q_{C_o^+} = I_o DT_s \quad (48)$$

$$Q_{C_o^-} = I_{C_o-off} (1-D) T_s \quad (49)$$

در یک دوره ی کلیدزنی، $Q_{C_o^+} = Q_{C_o^-}$ ، بنابراین:

$$I_{C_o-off} = \frac{D}{1-D} I_o \quad (50)$$

واضح است که در بازه ی خاموش سازی کلید، $i_{D_o} = i_{C_o} + i_o$ ، بنابراین:

$$I_{D_o-off} = I_{C_o-off} + I_o = \frac{1}{1-D} I_o \quad (51)$$

تغییر جریان خروجی دیود iDo در بازه ی خاموش شدن کلید، برابر با Δi_{L3} است. همچنین،

برابر است با: Δi_{L3}

$$\Delta i_{L3} = \frac{DT_s}{L_3} (V_{in} + V_{C_a} - V_{C_s}) = \frac{DT_s}{L_3} 2V_{in} \quad (52)$$

تغییر خروجی جریان دیود iDo باتوجه به (5-78) به صورت زیر تعریف شده است:

$$\begin{aligned} \xi_{i_{D_o}} &= \frac{\Delta i_{L3} / 2}{I_{D_o-off}} = \frac{\Delta i_{L3} (1-D)}{2I_o} = \frac{T_s V_{in}}{L_3 I_o} D (1-D) \\ &= \frac{T_s V_o D (1-D)^2}{L_3 I_o (3D+1)} = \frac{D (1-D)^2}{(3D+1)} \frac{R}{f_s L_3} \end{aligned} \quad (53)$$

۲-۱-۶ عملکرد حالت هدایت غیر پیوسته

اگر iDo در طول بازه ی خاموش شدن کلید به صفر کاهش پیدا کند، مبدل پیشنهادی در حالت هدایت غیر پیوسته کار خواهد کرد. پس عملکرد مبدل پیشنهادی می تواند به سه حالت تحت عملکرد حالت هدایت غیر پیوسته تقسیم شود. حالت ۱ و حالت ۲ مانند همان حالت های عملکردی در CCM هستند و در حالت سوم، کلیدهای S1 و S2 و دیودهای Do و Da خاموش هستند و همچنین ولتاژ دو سر سلف های L1، L2 و L3 تقریباً صفر است. شکل موج کلیدی تحت عملکرد DCM و مسیر شارش

جریان در حالت سوم در شکل ۵-۱۲-ب و ۵-۱۳-ج به ترتیب نمایش داده شده است. باتوجه به (۵۴) در شرایط عملکردی DCM داریم:

$$\xi_{i_{Do}} = \frac{\Delta i_{L3} / 2}{I_{Do-off}} = \frac{D(1-D)^2}{(3D+1)} Z \geq 1 \quad (54)$$

که Z به صورت $f_s L_3 \frac{R}{Z}$ تعریف شده است. هنگامی که i_{Do} به مقدار صفر در $t=Ts$ کاهش پیدا می کند، مدار در مرز CCM و DCM کار می کند؛ بنابراین، در مرز هدایت، Z قابل دستیابی از:

$$Z_B = \frac{3D+1}{D(1-D)^2} \quad (55)$$

تا هنگامی که $Z > Z_B$ مبدل تحت DCM کار می کند و i_{Do} در $t = (D+\Delta)T_s$ به صفر کاهش پیدا می کند. که، $0 < \Delta < 1-D$. بنابراین، با جای گذاری رابطه ی (۴۲) و (۴۳) در (۵۵) و (۵۶) به ترتیب خواهیم داشت:

$$\frac{1}{T_s} \left(\int_0^{DT_s} V_{in} dt + \int_{DT_s}^{(D+\Delta)T_s} \frac{(V_{in} - V_o + V_{C_s})}{2} dt \right) + \int_{(D+\Delta)T_s}^{T_s} 0 dt = 0 \quad (51-8)$$

$$\frac{1}{T_s} \left(\int_0^{DT_s} (V_{in} + V_{C_a} - V_{C_s}) dt + \int_{DT_s}^{(D+\Delta)T_s} -V_{C_s} dt \right) + \int_{(D+\Delta)T_s}^{T_s} 0 dt = 0 \quad (56)$$

با استفاده از (۴۲) و (۵۶)، ولتاژ C_s و C_a می تواند به ترتیب با استفاده از (۵۷) و (۵۸) محاسبه شود و باتوجه به (۵۵) و (۵۷)، بهره ی ولتاژ انتقالی در عملکرد DCM مطابق (۵۹) خواهد بود.

$$V_{C_s} = \frac{2D}{\Delta} V_{in} \quad (57)$$

$$V_{C_a} = \frac{2D + \Delta}{\Delta} V_{in} \quad (58)$$

$$M_{DCM} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{4D + \Delta}{\Delta} \quad (59)$$

تقریباً تمام بار مصرف شده برابر با بار انتقالی L_3 در بازه ی خاموش شدن کلید است؛ بنابراین:

$$I_o T_s = \frac{\Delta i_{L3} T_s \Delta}{2} \quad (60)$$

با جای گذاری معادله ی (۵۱) در (۶۰):

$$\frac{V_o T_s}{R} = \frac{DT_s}{L_3} 2V_{in} \frac{T_s \Delta}{2} = \frac{\Delta DT_s^2}{L_3} \frac{\Delta}{4D + \Delta} V_o \quad (61)$$

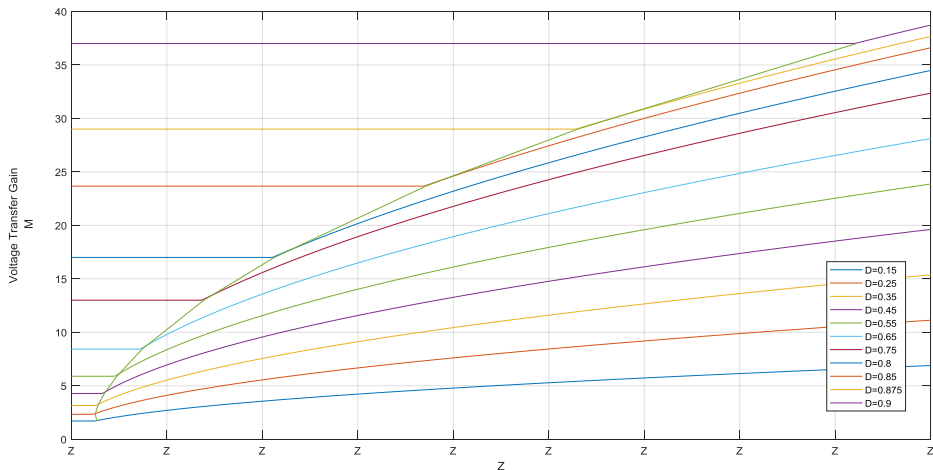
پس از ساده سازی، Δ می تواند محاسبه شود:

$$\Delta = \frac{\sqrt{16ZD^2 + 1} + 1}{2DZ} \quad (62)$$

از (۵۹) و (۶۲)، بهره ی انتقالی ولتاژ در عملکرد DCM، MDCM برابر است با:

$$M_{DCM} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{8D^2 Z + \sqrt{16ZD^2 + 1} + 1}{\sqrt{16ZD^2 + 1} + 1} \quad (63)$$

منحنی مرز بین DCM و CCM با استفاده از (۴۵)، (۵۴) و (۶۳) محاسبه می شود. بهره ولتاژ انتقالی برحسب Z در شکل ۵-۱۴ نمایش داده شده است. مبدل پیشنهادی اگر $Z < Z_B$ باشد در CCM و در غیر این صورت در DCM کار می کند.



شکل (۴) مرز بین CCM و DCM و بهره ی ولتاژ برحسب Z

۷- ملاحظات طراحی

برای داشتن عملکرد مناسب، اجزای مبدل باید به شکل مناسبی طراحی شوند. همچنین، چون کارکرد در DCM معایبی چون پاسخ دینامیک کند، وابستگی به فرکانس کلیدزنی، توان خروجی و مقدار سلف و فشار بالای جریان روی نیمه هادی مبدل پیشنهادی دارد، باید برای کارکردن در شرایط CCM طراحی شود [۹۶].

۷-۱-۱ انتخاب سیکل کاری

با استفاده از (۴۵) سیکل کاری مبدل می‌تواند بر اساس معادله‌ی (۶۴) محاسبه شود:

$$D = \frac{V_o - V_{in}}{V_o + 3V_{in}} \quad (64)$$

ذکر این نکته الزامی است که یک محدوده‌ی کاربردی در سیکل کاری (D) برای مبدل پیشنهادی و به‌طور کلی برای مبدل‌های DC-DC وجود دارد. زیرا، انتخاب نسبت‌های بزرگ تلفات هدایت را افزایش می‌دهد و همچنین به‌شدت باعث تحریک بازیافت معکوس دیود می‌شود.

۷-۱-۲ فشار ولتاژ روی کلیدها و دیودها

باتوجه به شکل ۵-۱۲ و ۵-۱۳ مشاهده می‌شود که فشار ولتاژی روی کلیدها یعنی $V_{ds.S1}$ و $V_{ds.S2}$ به‌صورت زیر است. فشار ولتاژی روی دیودهای V_{Do} و V_{Da} طبق (۵-۹۲) محاسبه شده است.

$$V_{ds.S1} = V_{ds.S2} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (65)$$

$$V_{Da} = V_{Do} = \frac{2V_{in}}{1-D} \quad (66)$$

۷-۱-۳ طراحی سلف

ریپل جریان سلف‌های $L1$ و $L2$ با استفاده از معادله‌ی مشابه محاسبه شده است. انتخاب سلف به ولتاژ سلف، جریان ریپل، فرکانس کلیدزنی و سیکل کاری بستگی دارد [۹۷]. ولتاژ اندوکتانس‌های ورودی $L1$ و $L2$ با استفاده از (۶۷) به‌دست‌آمده است.

$$L_1 = L_2 = \frac{V_{in}D}{\Delta i_{L} f_s} \quad (67)$$

باتوجه به (۳۶) و (۴۱)، ولتاژ $L3$ برابر با $2V_{in}$ در حالت ۱ است؛ بنابراین مقدار اندوکتانس $L3$ به‌صورت زیر قابل محاسبه است.

$$L_3 = \frac{2V_{in}D}{\Delta i_{L} f_s} \quad (68)$$

۴-۱-۷ طراحی خازن

مقاومت معادل سری خازن صفر در نظر گرفته شده است. مقدار خازن خروجی C_o به توان خروجی میدل ولتاژ خروجی V_o ، ریپل ولتاژ ΔV_c و فرکانس کلیدزنی وابسته است که با استفاده از معادله‌ی (۶۹) به دست می‌آید [۹۷].

$$C_o = \frac{DI_o}{\Delta V_c f_s} \quad (۶۹)$$

با در نظر گرفتن خازن C_s برابر با C_a که هر دوی آن‌ها ولتاژ ریپل یکسانی دارند، مقدار خازن‌ها می‌تواند با استفاده از تغییر بار خازن محاسبه شود [۹۷]. براین اساس، مقدار C_s و C_a از رابطه‌ی (۷۰) محاسبه می‌شود.

$$C_s = C_a = \frac{I_o}{\Delta V_c f_s} \quad (۷۰)$$

۵-۱-۷ فشار جریان روی کلیدها و دیودها

بار C_s در حالت ۱ افزایش می‌یابد و در حالت ۲ کاهش می‌یابد. همچنین در یک دوره‌ی کلیدزنی

$$Q_{C_s^-} = Q_{C_s^+} \quad \text{پس:}$$

$$Q_{C_s^+} = I_o D T_s \quad (۷۱)$$

$$Q_{C_s^-} = I_{C_s-off} (1-D) T_s \quad (۷۲)$$

$$I_{C_s-off} = \frac{D}{1-D} I_o \quad (۷۳)$$

هر دو دیود D_a و D_o در حالت ۲ روشن هستند و فشار جریانی آن‌ها برابر است و می‌تواند با استفاده از رابطه‌ی (۷۴) به دست آید.

$$i_{D_o,max} = i_{D_a,max} = I_{C_s-off} + i_{L3,max} \quad (۷۴)$$

که برابر $i_{L3,max}$ است با:

$$i_{L3,max} = I_{L3} + \frac{\Delta i_{L3}}{2} = I_o + \frac{\Delta i_{L3}}{2} \quad (۷۵)$$

بنابراین، با جای‌گذاری (۶۸)، (۷۳) و (۷۵) در (۷۴)، $i_{D_o,max}$ و $i_{D_a,max}$ می‌تواند

به صورت زیر به دست آید:

$$i_{D_o,max} = i_{D_a,max} = \frac{I_o}{1-D} + \frac{V_{in} D}{L_3 f_s} \quad (۷۶)$$

جریان کلید برابر با جمع جریان‌های سلف‌های $L1$ ، $L2$ و $L3$ است. جریان کلید یک شکل موج نوزنقه‌ای است که در شکل ۵-۱۲ نمایش داده شده است. هر دو کلید $S1$ و $S2$ در حالت ۱ روشن می‌شوند و فشار جریان آن‌ها برابر است و می‌تواند از (۷۷) به دست آید.

$$i_{S_i, \max} = i_{L_i, \max} + i_{L_3, \max} \quad (77)$$

که $i=1:2$ با استفاده از (۷۸) به دست آمده است و جریان میانگین سلف‌های ورودی $IL1$ و $IL2$ با استفاده از معادله‌ی (۷۹) محاسبه شده‌اند.

$$i_{L_i, \max} = I_{L_i} + \frac{\Delta i_{L_i}}{2} \quad (78)$$

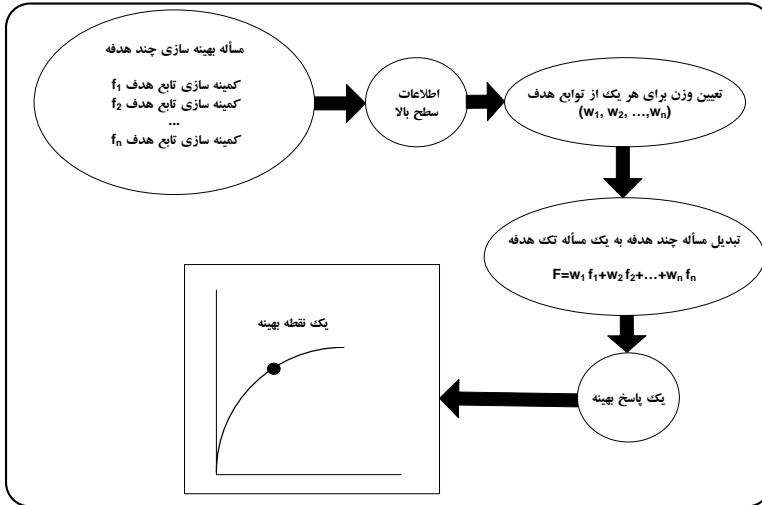
$$I_{L_i} = \frac{I_{in} - I_o}{2} D + I_{in} (1 - D) \quad (79)$$

نهایتاً با جایگزینی (۴۶)، (۴۷)، (۶۸)، (۷۳)، (۷۵)، (۷۸) و (۷۹) در رابطه‌ی (۷۷)، فشار جریان روی کلیدهای $i_{S_i, \max}$ با رابطه‌ی (۸۰) به دست می‌آید. همان‌طور که قبلاً در (۴۶) ذکر شد، در شرایط واقعی، جریان ورودی کمی بیشتر از مقدار به دست آمده در (۴۶) است، بنابراین $i_{S_i, \max}$ کمی بیشتر از مقدار محاسبه شده در رابطه‌ی (۸۰) است.

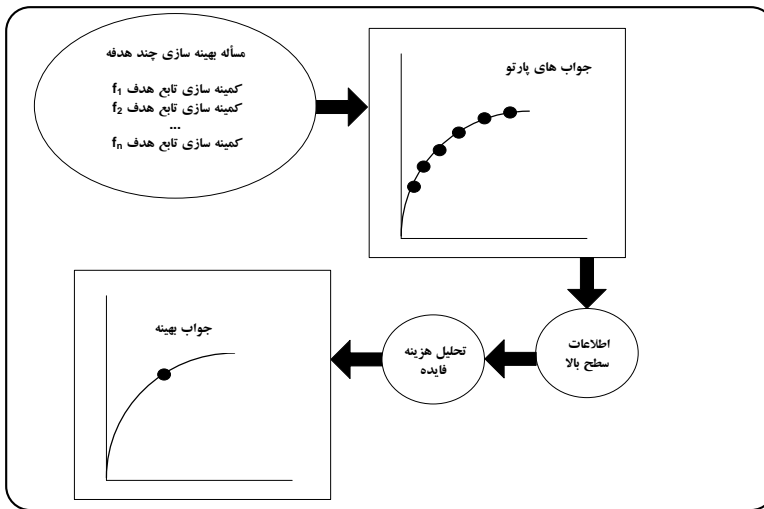
$$i_{S_i, \max} = \frac{(2 + D(1 - D))I_o}{1 - D} + V_{in} D \left(\frac{1}{2fL_i} + \frac{1}{L_3 f} \right) \quad (80)$$

۸- بهینه‌سازی چندهدفه

در این مقاله جهت حل مسئله چندهدفه با رویکرد پسینی III به موضوع پرداخته شده است. این رویکرد نسبت به روش حل پیشینی V 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 برنامه‌ریز سیستم ممکن است نتواند وزن‌های مناسبی برای هر یک از توابع هدف پیدا کند که در این صورت ممکن است جواب‌های به دست آمده قابل اطمینان نباشند. در رویکردهای پسینی، توسط اطلاعات سطح بالا جواب‌های پارتو مشخص شده و برنامه‌ریز سیستم این قابلیت را دارد که با توجه به معیارهای خود جواب بهینه را از بین جواب‌های پارتو تعیین نماید در شکل ۲ نحوه به دست آوردن جواب بهینه در رویکردهای پسینی آمده است [۱۹].



شکل (۵): رویکرد پیشینی در حل مسائل چندهدفه



شکل (۶): رویکرد پسینی در حل مسائل چندهدفه

۱-۸ روش محدودیت اسیلون

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

$$\begin{aligned} \min \quad & f_1(x) \\ \text{s.t:} \quad & f_2(x) \leq \epsilon_2, f_3(x) \leq \epsilon_3, \dots, f_M(x) \leq \epsilon_M \\ & \text{other constraints} \end{aligned} \tag{۸۱}$$

روش محدودیت ϵ دو مرحله دارد: ایجاد جدول پرداخت^v و استفاده از محدوده‌های جدول پرداخت به منظور 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 Vi) منجر می‌شود، بنابراین تنها راه‌حل‌های افراطی کارآ تولید می‌شود. در مقابل، روش محدودیت ϵ منطقه امکان‌پذیر Vi اصلی را تغییر می‌دهد و قادر به تولید راه‌حل‌های کارآمد غیرافراطی است. در نتیجه، در روش وزن‌دهی Vi 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 $i X$ در مسائل برنامه‌ریزی متشکل از عدد صحیح و ترکیبی X چندهدفه تولید کند درحالی‌که روش محدودیت ϵ این مشکل را ندارد.
۳. در روش وزن‌دهی مقیاس‌بندی توابع هدف تأثیر زیادی در نتایج به دست آمده 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.

۲-۸ 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 بادقت 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. به منظور 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.

۱-۲-۸ 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 به دست آمده
- جمع‌بندی نتایج حاصل از تک تک 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:

$$E(F) = \sum_{x \in \chi} F(x)P(x) \quad (۸۲)$$

$$\hat{E}(F) = \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^{NS} F(x_i) \quad (۸۳)$$

که در رابطه فوق، NS تعداد نمونه‌ها، X_i مقدار نامین نمونه و $F(x_i)$ نتیجه تست برای نامین 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:

$$V(\hat{E}(F)) = \frac{V(F)}{NS} \quad (۸۴)$$

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

$$\hat{V}(F) = \frac{1}{NS-1} \sum_{i=1}^{NS} (F(x_i) - \hat{E}(x_i))^2 \quad (۸۵)$$

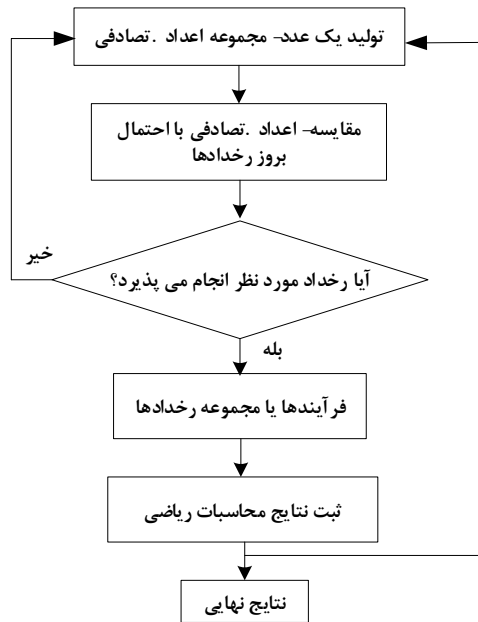
از این رو، میزان خطا در شبیه‌سازی مونت کارلو، β مطابق رابطه‌ی (۸۶) محاسبه می‌شود. فلوچارت کلی الگوریتم‌های مونت کارلو در شکل (۳) آمده است.

$$\beta = \sqrt{\frac{V(F)}{NS \hat{E}(F)}} \quad (۸۶)$$

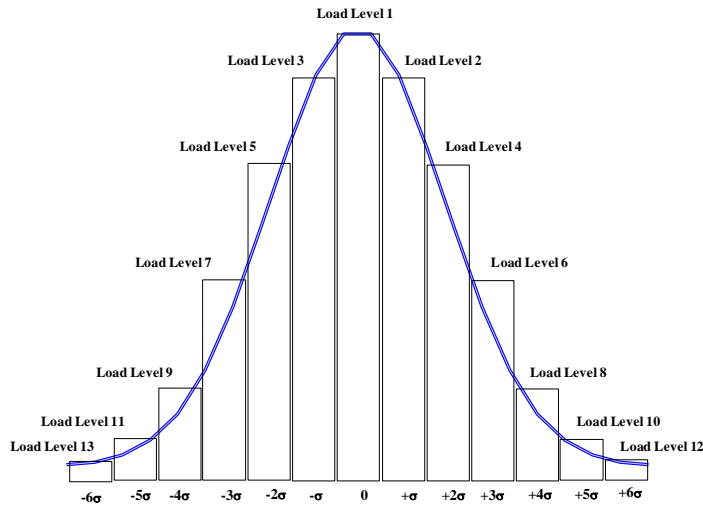
به‌طور کلی عدم قطعیت‌های معین در سیستم قدرت با توابع توزیع احتمالاتی تخمین زده می‌شوند [۱۹]. به‌عنوان مثال بارها و خروجی منابع تجدید پذیر انرژی در سیستم قدرت با توابع توزیع احتمالی نرمال تخمین زده می‌شوند [۲۰]. قابل ذکر است که، روش ارائه شده در این کار تحقیقاتی می‌تواند برای هر نوع تابع توزیع احتمالی 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 تقریب‌زنی، هرچه 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. 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 (۷): فلوجارت الگوریتم مونت کارلو



شکل (۸): تخمین بار الکتریکی توسط تابع توزیع نرمال ناپیوسته

$$P = \begin{cases} P_1 & \text{Load} = I_1 \\ P_2 & \text{Load} = I_2 \\ \vdots & \\ P_n & \text{Load} = I_n \end{cases} \quad (۸۷)$$

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 قیود مربوطه در رابطه‌ها آمده است و نحوه شارژ و دشارژ آنها توسط الگوریتم برنامه‌نویسی تعیین می‌شود.

۲-۲-۸ مدل عدم قطعیت باد

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

$$f_U(U) = \begin{cases} 0 & U < 0 \\ \frac{K}{C} \left(\frac{U}{C}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{U}{C}\right)^K} & U \geq 0 \end{cases} \quad (۸۸)$$

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.

$$\mu_U = C\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) \quad (۸۹)$$

$$\sigma_U^2 = C^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{K}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) \right]^2 \right] \quad (۹۰)$$

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

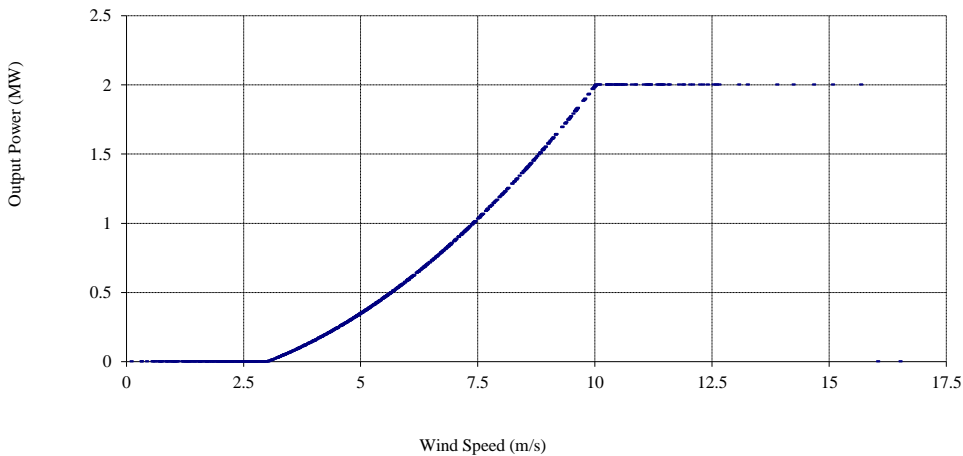
$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (۹۱)$$

با جایگزینی $K=2$ ، تابع توزیع رایلی χ^2 حاصل می‌شود؛ بنابراین، رابطه (۸۹) به صورت رابطه زیر در می‌آید.

$$\mu_U = \frac{\sqrt{\pi}}{2} C \quad (۹۲)$$

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:

$$\begin{aligned} P_R |_{WF} &= nP_R |_{WT} \\ U_{CI} |_{WF} &= U_{CI} |_{WT} \\ U_R |_{WF} &= U_R |_{WT} \\ U_{CO} |_{WF} &= U_{CO} |_{WT} \end{aligned} \quad (۹۳)$$



شکل (۹): تابع توان خروجی یک توربین بادی

۳-۲-۸ مدل عدم قطعیت در تولید توسط PV

برای مدل سازی عدم قطعیت سیستم فتوولتاییک دقیقاً مطابق رویه به کاررفته در مدل سازی انرژی بادی و بار الکتریکی استفاده می شود با این تفاوت که در این حالت از تابع چگالی احتمال بتا برای تابش یا همان $G(t)$ به کار برده می شود. رابطه تابع چگالی احتمال بتا (betapdf) مطابق زیر است:

$$\text{betapdf}(x, a, b) = \frac{1}{B(a, b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1} \quad (94)$$

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

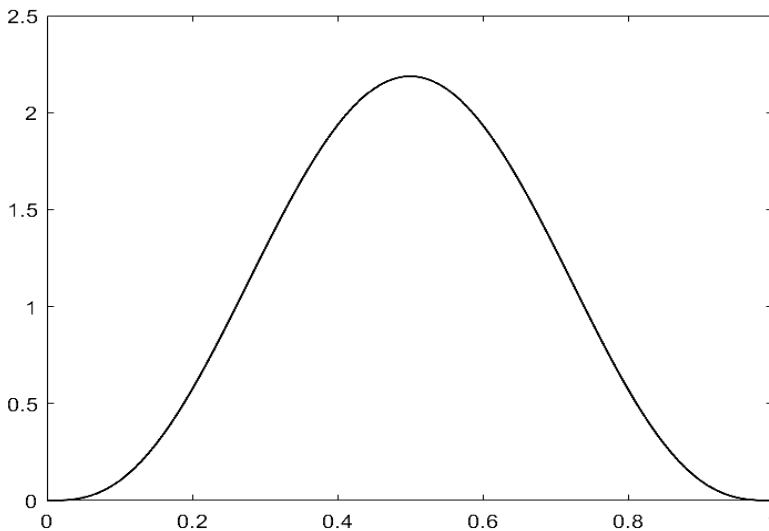
$$B(a, b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} \quad (95)$$

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

۹- نتایج شبیه سازی

۹-۱ شبیه سازی بار الکتریکی

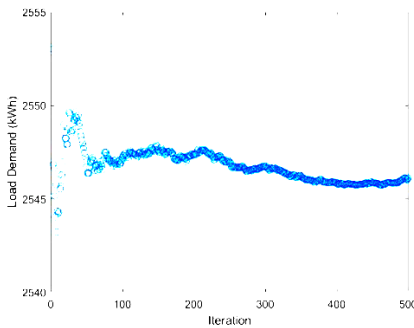
ابتدا ما نیازمند این هستیم که بارها در حداکثر مقدار خود بهینه شوند تا از اتلاف انرژی و هزینه های اضافی جلوگیری شود، بهینه سازی مربوط به پروفیل بار در چهار دوره ۶ ساعته صورت گرفته است. نتایج حاصل از تخمین و پیش بینی بار الکتریکی منطبق بر الگوریتم مونت کارلو در شکل های (الف-۷) تا (ب-۸) برای هر دوره زمانی آمده است. مقدار نهایی بار الکتریکی و بار حرارتی در جدول (۳) آمده است. در فصل چهارم به بررسی کامل این موارد پرداخته شد.



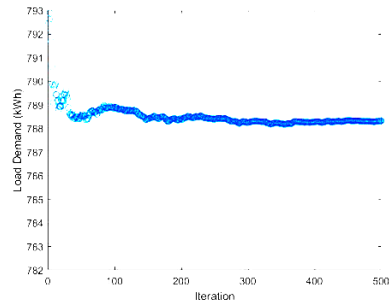
شکل (۱۰): تابع چگالی احتمال بتا به ازای پارامترهای $a=b=4$

جدول (۳): اطلاعات مربوط به بارهای الکتریکی و حرارتی

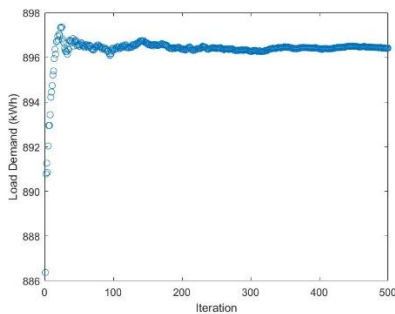
| بازه زمانی | بار الکتریکی (kWh) | بار حرارتی (kW _{heat}) |
|------------|--------------------|----------------------------------|
| ۱ | ۷۸۰/۳۲ | ۱۸/۰۳۶ |
| ۲ | ۲۵۴۶/۱۲ | ۱۴/۵۳۳ |
| ۳ | ۲۵۰۶/۱۲ | ۱۰/۸۳۸ |
| ۴ | ۸۹۶/۴۲ | ۰/۰ |



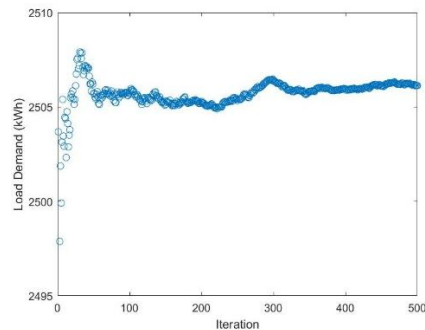
(ب)



(الف)



(د)



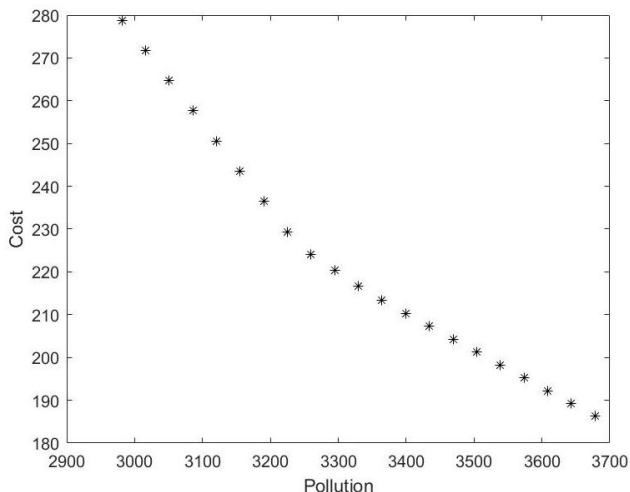
(ج)

شکل (۱۱): 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

۲-۹ 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. بنابراین لازم است برخی بارهای غیرضروری (مانند: چراغ‌هایی که در روز روشن می‌مونن یا در مناطق بدون تردد نصب شدن، نورپردازی تزئینی یا محیطی که نقشی در امنیت نداره از مدار خارج شوند و سیستم‌های گرمایش، سرمایش در فضاهای

بلااستفاده و...). 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 (۱۲) و جدول (۴) آمده است.

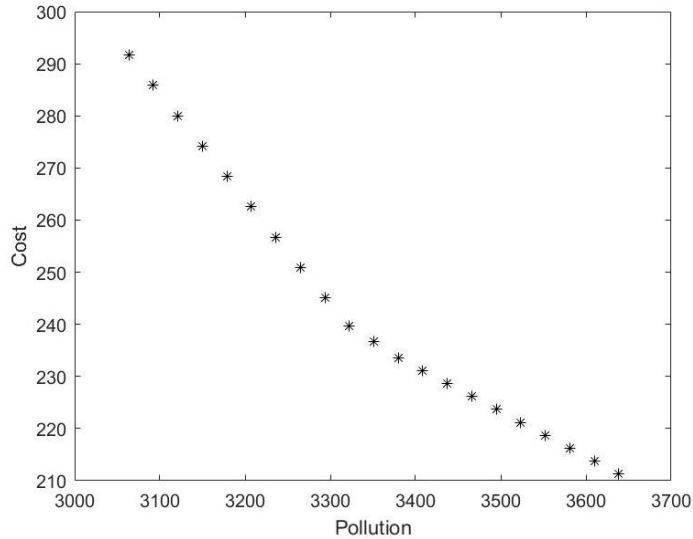


شکل (۱۲): نتایج پارتو حاصل از سناریو اول

جدول (۴): 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 (۱۳) و جدول (۵) آمده است. پس از اجرای برنامه ۲۱ پاسخ شبه بهینه حاصل می‌شود که مطابق شکل (۱۳) است.

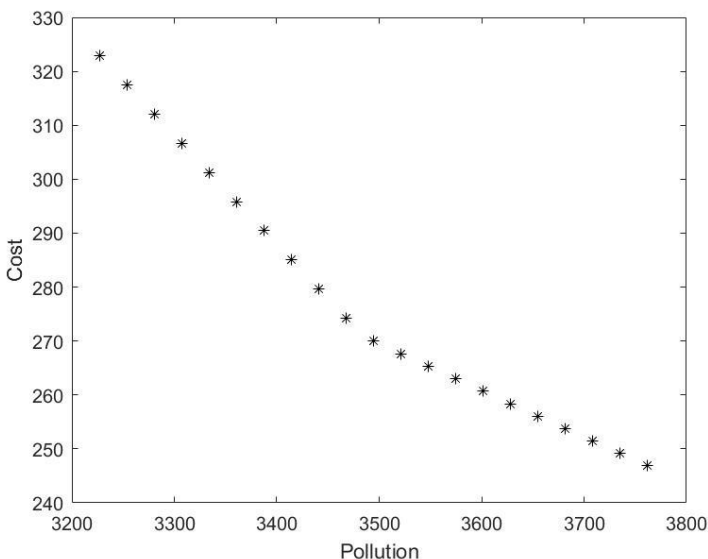


شکل (۱۳): مجموعه جواب‌های شبه‌بهینه

جدول (۵): 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 (۱۴) نمایانگر این است که در این شرایط نیز سیستم قادر است به رفع نیازهای بار ساختمان بپردازد. جدول (۶) نیز خروجی منابع به‌کاررفته در سناریو سوم را نشان می‌دهد.



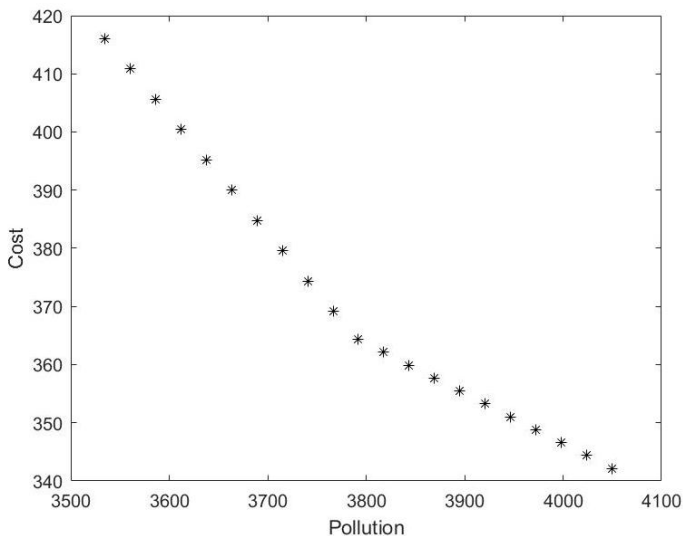
شکل (۱۴): مجموعه جواب‌های شبه‌بهینه در سناریو سوم

جدول (۶): خروجی منابع به کاررفته 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 (۱۵) و جدول (۷) به دست خواهد آمد.



شکل (۱۵): مجموعه جواب‌های شبه‌بهینه در سناریوی بهینه‌شده‌ی چهارم

جدول (۷): 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 (۱۲) تا (۱۵) 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.

۱۰-تشریح و قدردانی

به پاس الطاف بی‌دریغ و همت والایتان، صمیمانه‌ترین سپاس‌ها را تقدیم می‌دارم و قدردان بزرگواری و فضل شما هستم.

۱۱- تعارض منافع

نویسنده (گان) اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

۱۲- دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

۱۳- نتیجه گیری

طرح ساختمان‌های صفر انرژی (Zero Energy Buildings یا ZEB) برای انواع مختلفی از سازه‌ها قابل استفاده است، اما 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 مورد منابع تغذیه‌ی سوئیچینگ، یک مبدل SEPIC بدون سلف تزویج و با بهره‌ی ولتاژ بالا پیشنهاد شده است. مبدل معرفی شده، ساده است و اصلاح مبدل SEPIC تنها با اضافه کردن چهارعنصر انجام شده است. مبدل پیشنهادی، مزایای زیادی مثل جریان ورودی پیوسته، بهره‌ی ولتاژ بسیار بالا، ولتاژ خروجی بدون تبدیل و سیستم کنترل ساده دارد. علاوه بر این، بهره‌ی ولتاژ بسیار بالا بدون استفاده از سلف تزویج و ترانسفورماتور به دست آمده است. بنابراین، هیچ فراجهدش ولتاژی روی دو سر کلیدها نمی‌افتد و به هیچ مدار کلمپی نیاز نداریم. این اثر تلفات هدایت را با استفاده از ولتاژ کمتر کلیدها با $R_{ds(on)}$ کمتر، کاهش می‌دهد و طراحی با حجم کمتر را ممکن می‌سازد. تحلیل حالت دائم مبدل تحت DCM و CCM و ملاحظات طراحی ارائه شد. بهره‌ی ولتاژ، فشار ولتاژ روی کلیدها و دیودها و تعداد عناصر بین مبدل پیشنهادی و مبدل‌های بدون سلف تزویج اخیر مقایسه شد. باتوجه به نتایج ارائه شده، بهره‌ی ولتاژ مبدل پیشنهادی بالاتر از سایر توپولوژی‌ها است. همچنین، درصد فشار ولتاژی روی کلیدها باتوجه به ولتاژ خروجی در مبدل پیشنهادی کمتر است. به علاوه، تعداد کل عناصر در مبدل پیشنهادی، کمتر از سایر مبدل‌ها است که بهره‌ی ولتاژی نزدیک به مبدل پیشنهادی را ایجاد می‌کنند؛ بنابراین، مبدل پیشنهادی از ویژگی‌های مناسبی جهت استفاده در سیستم موردنظر برخوردار است. در نهایت این مقاله به برنامه‌ریزی یک ساختمان با دو هدف رفع نیاز در زمان بحران کشور و رعایت اصول پدافند غیر عامل که در نظام آنارشیک بین‌المللی توجه ویژه‌ای به آن دارند و می‌توان

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 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 ساختمان های سیاسی مهم کشور و ستاد های نیروهای مسلح به مرحله اجرا درآورد.

۱۴- مراجع

- [1] European Commission, 2005, "Doing More with Less", Green Paper on energy efficiency 22.06.2005 COM(2005).
- [2] 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).
- [3] N. G. Paterakis, O. Erdiñ, 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).
- [4] U.S. Energy Information Administration, "Energy Efficiency Trends in Residential and Commercial Buildings," Energy Information Administration, 2008.
- [5] 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.
- [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] 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).
- [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: Vandenhoeck und Ruprecht, 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] Zarezadeh, E., Moradi, S. A. H., & Salimi, M. (2015). Studying wavelet transform and selecting a less fault wavelet function for ordinary fault detection in HDVC transmission systems. International Science and Investigation journal, 4(1), 40-52.
- [20] X.-F. Wang, Y. Song, and M.
- [21] Irving, Modern power systems analysis. Springer Science & Business Media, 2010.
- [22] 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).
- [23] 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).
- [24] Z. Lubosny and Z. Lubosny, Wind turbine operation in electric power systems: advanced modeling. Springer, 2003 (doi: 10.1007/978-3-662-10944-1)
- [25] greenac.co/محاسبه-ظرفیت-کولر-گازی/
- [26] F. AL-Hazemi, J. Lorincz and A. F. Y. Mohammed, "Minimizing Data Center Uninterruptable Power Supply Overload by Server Power Capping," in IEEE Communications Letters, vol. 23, no. 8, pp. 1342-1346, Aug. 2019, doi: 10.1109/LCOMM.2019.2919717.

iDemand

ii Photovoltaic

iii Posteriori approaches

iv Priori approaches

-
- v Payoff Table
 - vi Extreme solution
 - vii Feasible
 - viii Weighting
 - ix Unsupported efficient solution
 - x Mixed integer programming
 - xi Weibull Distribution Function
 - xii Rayleigh Distribution Function