

یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه فازی برای مدیریت تولید و مصرف در شبکه‌های هوشمند کوچک انرژی

یحیی محمدی^۱، حامد شکوری گنجوی^۲، عالیہ کاظمی^{۳*}

^۱ دکتری مدیریت تولید و عملیات، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، پردیس کیش، تهران، ایران

yahya.mohammadi.b@ut.ac.ir

^۲ دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران، ایران

hshakouri@ut.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

aliyekkazemi@ut.ac.ir

چکیده: انرژی الکتریکی یکی از مهم‌ترین حامل‌های انرژی مورد استفاده در ساختمان‌هاست. با معرفی شبکه‌های هوشمند (SG) انرژی و در مقیاس کوچک‌تر شبکه‌های هوشمند کوچک (MSG) انرژی در کنار هوشمندسازی ساختمان‌ها، بستر مناسبی برای برنامه‌ریزی بهینه تولید و مصرف انرژی الکتریکی فراهم شده است. در این مقاله، یک MSG شامل منابع تجدیدپذیر، دیزل ژنراتور و باتری سلولی با قابلیت خرید و فروش توان الکتریکی با SG مدل شده است که در سمت مصرف‌کننده به ساختمان هوشمند شامل بارهای روشنایی، دمایی و تهویه مطبوع متصل است. برای پیاده‌سازی سیستم مدیریت هوشمند ساختمان و همچنین در MSG برای مدیریت منابع تولید انرژی و خرید و فروش برق با SG از کنترل‌های فازی استفاده شده است. متغیرهای تصمیم‌گیری، قوانین کنترل‌های فازی هستند که توسط الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه (NSGAII) با در نظر گرفتن پنج تابع هدف مختلف بهینه شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده قابلیت عملکرد بهتر کنترل‌های فازی در مقایسه با روش‌هایی است که مستقیماً توان تخصیص داده شده به بارهای ساختمان را به عنوان متغیر تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار داده‌اند.

واژه‌های کلیدی: MSG، ساختمان هوشمند، کنترل فازی، NSGAII، بهینه‌سازی چندهدفه.

۱. مقدمه

مصرفی ساختمان را کاهش می‌داد [۱۶]. کربن و همکاران یک مدل مبتنی بر MILP را برای کمینه کردن هزینه در یک MSG مسکونی متصل به شبکه SG ارائه کردند [۱۷]. هابر و همکاران از روش MILP برای به حداقل رساندن هزینه برق در یک مجموعه ساختمان مسکونی مجهز به واحدهای کوچک CHP^۵ و سلول‌های فتوولتائیک استفاده کردند [۱۸]. دهناد و شکوری گنجوی نیز یک مدل ریاضی چندهدفه برای مدیریت بار در یک ساختمان هوشمند ارائه کردند. در این مدل، اولویت‌های رفاهی کاربران در ساختمان هوشمند مورد توجه قرار گرفت [۱۹]. ژانگ و همکاران در تحقیق خود، هدف را بر کمینه کردن هزینه پیش‌بینی شده انرژی مصرفی در یک روز، استفاده مناسب از مولدهای تولید پراکنده و بهینه کردن مقدار مصرف بارهای داخل ساختمان هوشمند قرار دادند [۲۰ و ۲۱]. زکریازاده و همکاران یک روش برنامه‌ریزی انرژی تصادفی جدید را برای MSG ارائه کردند که همه سناریوهای پاسخ‌گویی به نیاز مصرف‌کننده را در نظر می‌گرفت. در روش آن‌ها انواع مصرف‌کننده از قبیل مسکونی، تجاری و صنعتی، مدل شده و عدم قطعیت‌های مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر با استفاده از متغیرهای تصادفی مناسب، در نظر گرفته شدند [۲۲]. شکوری گنجوی و کاظمی مسئله مدیریت تقاضا در یک ساختمان هوشمند را به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با محوریت هزینه و مدیریت بار حل نمودند. مدل توسعه داده شده، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و چندهدفه بود. این مدل برای مدیریت بارهای مختلف در ساختمان علاوه بر کاهش هزینه مصرف انرژی باعث کاهش بیشینه میزان مصرف ساختمان نیز می‌شد [۲۳].

برخی از محققان نیز از روش برنامه‌ریزی دینامیک برای بهینه‌سازی انرژی مصرفی در ساختمان هوشمند و نحوه استفاده از توان در SG بهره گرفته‌اند [۲۴، ۲۵ و ۲۶]. نگوین و همکاران برای بهینه‌سازی یک مدل MSG دارای منابع انرژی تجدیدپذیر از برنامه‌ریزی دینامیک استفاده کردند. مدل آن‌ها شامل CHP، آرایه خورشیدی، توربین بادی، پیل سوختی و یک مبدل گرمایی بود. آن‌ها مدل ارائه شده را در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای، با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیک برای رسیدن به بیشترین سود برای مالک MSG بهینه نمودند [۲۷]. میترا و همکاران مدل یک MSG را با در نظر گرفتن هزینه و قیود قابلیت اطمینان، با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیک بهینه کردند [۲۸]. نگوین و همکاران یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی دینامیک و روش سیمپلکس^۶ را برای برنامه‌ریزی توان در MSG استفاده کردند. مدل MSG دارای منابع تجدیدپذیر و دیزلی بوده و هدف مسئله، کمینه کردن

بحث انرژی به‌عنوان یکی از مقوله‌های بسیار مهم در دنیای امروز، از جنبه رفاهی، اقتصادی و علمی خارج شده و مرزهای دنیای سیاست و جنگ بین کشورها را درنوردیده و بقا و یا نابودی جوامع، وابسته به میزان دسترسی به منابع انرژی، امنیت و پایداری آن‌هاست [۱]. با توجه به اینکه معماری و اساس شبکه‌های برق از ابتدای پیدایش آن در ابتدای قرن بیستم تا دهه‌های قبل، دچار انقلاب و تغییر چندانی نشده است، فقدان اندازه‌گیری، نظارت، تبادل داده و تجهیزات کنترلی هوشمند در بخش‌های مختلف این شبکه‌ها به‌خوبی احساس می‌شود [۲]. برای غلبه بر این مشکلات، شبکه‌های SG^۱ معرفی شدند [۳]. شبکه SG دارای یک زیرساخت ارتباطی دوطرفه بین تأمین‌کننده و مصرف‌کننده است. این زیرساخت، مصرف‌کننده را قادر می‌سازد تا در بهترین زمان ممکن از لحاظ هزینه و یا بیشینه مصرف شبکه، نسبت به تغییر الگوی مصرف خود اقدام کند [۴ و ۵]. با توسعه تولیدات پراکنده، شبکه‌های MSG^۲ معرفی شدند [۶ و ۷]. در این نوع از شبکه‌ها انواع سیستم‌های تولید پراکنده به‌صورت ترکیبی با یکدیگر، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مصرف‌کنندگان نیز در ارتباط مؤثر و دوطرفه با شبکه MSG قرار دارند [۸ و ۹]. با ظهور شبکه‌های MSG و امکان تعامل نزدیک بین مصرف‌کننده و شبکه، مصرف‌کننده نقش مهمی را در شبکه ایفا کرده و ساختمان‌های هوشمند ایجاد شدند. یک ساختمان هوشمند قادر است بر اساس برنامه‌های تعریف شده داخلی و وضعیت بیرونی ساختمان، نسبت به کنترل منابع و سیستم‌های خود در راستای دستیابی به حداکثر بهینه‌سازی انرژی اقدام کند [۱۰ و ۱۱].

تاکنون در مقالات متعددی به مسئله مدیریت بهینه توان^۳ در ساختمان‌های هوشمند و بهینه‌سازی SG پرداخته شده است. در بسیاری از این تحقیقات، از روش‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)^۴ استفاده شده است [۱۲، ۱۳ و ۱۴]. الیویرا و همکاران دو تابع هدف آسایش و هزینه انرژی را برای بهینه‌سازی با استفاده از روش MILP در نظر گرفتند. روش آن‌ها دارای یک لایه تخمین‌گر بود و برنامه‌های مصرف بهینه را برای کنترل بارهای داخل ساختمان با توجه به شرایط مطلوب کاربر و پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوا محاسبه می‌کرد [۱۵]. پاریسیو و همکاران با استفاده از روش MILP مدل یک خانه هوشمند متصل به MSG را به‌گونه‌ای بهینه کردند که علاوه بر تأمین انرژی مورد نیاز ساختمان و در نظر گرفتن قیود عملیاتی، هزینه انرژی

1. Smart grid
2. Micro Smart Grid
3. Optimal Power Management
4. Mixed Integer Linear Programming

مبادله کند. در این مسئله با توجه به اینکه میزان تقاضای برق در طی ساعات مختلف از سوی مصرف‌کنندگان به صورت قطعی قابل پیش‌بینی نیست، در سمت مصرف‌کنندگان با عدم قطعیت در میزان مصرف مواجهیم و از سوی دیگر به دلیل اینکه تأمین انرژی الکتریکی توسط مولدهای انرژی تجدیدپذیر به وضعیت آب‌وهوایی مرتبط می‌باشد، در سمت تولید نیز با مسئله عدم قطعیت روبرو هستیم.

در ادامه در بخش ۲، مدل‌سازی مسئله بررسی می‌شود. در بخش ۳، توابع هدفی که در مدل‌سازی مسئله تعریف شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۴، عدم قطعیت تعریف‌شده در مسئله، مدل‌سازی می‌شود. در بخش ۵، نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مدل‌سازی مسئله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در انتها بخش نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲. مدل‌سازی مسئله

در این بخش، ابتدا خلاصه‌ای از فرایند تعریف مسئله و روش حل آن مورد بررسی قرار گرفته و سپس در ادامه به روش مدل‌سازی مسئله پرداخته می‌شود.

در اولین گام، یک مدل از ساختمان هوشمند و انواع بارهای مصرفی درون آن تشکیل شده است. بارهای تعریف‌شده درون ساختمان به سه دسته با قابلیت تغییر در توان مصرفی، با قابلیت تغییر در زمان بهره‌برداری و بارهای تغییرناپذیر در توان مصرفی و زمان، تقسیم شده‌اند. سیستم مدیریت هوشمند ساختمان وظیفه کنترل تأسیسات الکتریکی و مکانیکی ساختمان را با اهدافی همانند کاهش مصرف انرژی و تأمین رفاه ساکنان ساختمان بر عهده دارد. با توجه به اینکه مهم‌ترین ویژگی این مقاله، طراحی بهینه کنترل‌های هوشمندی است که بعد از مرحله بهینه‌سازی، بتواند به‌طور مستقل و بدون نیاز به محاسبه مجدد به کار خود ادامه دهند، درون ساختمان چهار کنترلر فازی تعریف شده است. وظیفه این کنترلرهای فازی، مدیریت انرژی مصرف‌کننده‌های مختلف همانند سیستم تهویه مطبوع، سیستم گرمایش، سیستم سرمایش و سیستم کنترل کیفیت هوا مبتنی بر خواسته‌های کاربران است. برای تأمین برق این ساختمان، یک MSG در نظر گرفته شده که در تعامل با ساختمان هوشمند است. MSG درون خود دارای مولد انرژی الکتریکی خورشیدی، بادی، دیزل ژنراتور و همچنین دارای یک باتری با قابلیت ذخیره انرژی الکتریکی و استفاده مجدد از آن است. برای مدیریت بهینه MSG نیز از کنترلرهای فازی استفاده شده است. قابلیت تعامل دوسویه بین شبکه MSG و شبکه SG یکی دیگر از ویژگی‌های این سیستم است. لذا این دو شبکه می‌توانند از یکدیگر برق خریده و یا به فروش برسانند.

به دلیل نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی، بحث عدم قطعیت در خصوص میزان انرژی الکتریکی تولیدشده مبتنی بر مولد خورشیدی و

هزینه روزانه کل انرژی الکتریکی مصرفی و بیشینه کردن بازدهی باتری‌ها در حین فرایند شارژ و دشارژ بود [۲۹]. در یک ساختمان هوشمند متصل به MSG تنها توجه به هزینه انرژی مصرفی کافی نبوده و اهداف دیگری همچون میزان آسایش در ساختمان، میزان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و کیفیت هوای داخل ساختمان نیز قابل اهمیت است. به همین دلیل در بسیاری از مقالات، از استراتژی چندهدفه برای بهینه‌سازی استفاده شده است [۳۰-۳۳]. برای مثال هارکوس و همکاران یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را برای طراحی ساختمان با انرژی صفر^۱ در یک منطقه با آب‌وهوای سرد در لبنان حل نمودند. آن‌ها برای بهینه‌سازی از روش بهینه‌سازی NSGAI^۲ استفاده کردند و محدودیت‌هایی همانند ظرفیت مولد انرژی خورشیدی و توان در دسترس از شبکه SG در نظر گرفته شد [۳۴]. صفایی و همکاران مدلی را برای یک ساختمان هوشمند متصل به MSG ارائه دادند. آن‌ها این مدل را با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه، بهینه کردند و توابع هدف در نظر گرفته‌شده نیز مجموع انرژی غیرتجدیدپذیر مورد استفاده در ساختمان، میزان گازهای گلخانه‌ای و هزینه انرژی مورد نیاز ساختمان بود که با قید برطرف کردن نیاز ساختمان و با استفاده از روش MOLP^۳ کمینه شدند [۳۵]. ما و همکاران یک مدل ریاضی برای یک SG متصل به چندین ساختمان هوشمند را ارائه و آن را با استفاده از یک استراتژی چندهدفه بهینه کردند. برای بهینه‌سازی مدل از روشی مبتنی بر تئوری بازی غیرهمکارانه^۴ استفاده شد [۳۶]. فراری و همکاران مدلی را برای مشتریانی که توانایی تولید انرژی مورد نیاز خود را دارند، ارائه دادند. آن‌ها از یک روش بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تنظیم بهینه تولید و بار مشتریان، به‌منظور کمینه کردن هزینه و تأمین نیاز مشتری استفاده کردند [۳۷].

در مقاله حاضر، یک ساختمان هوشمند که دارای سیستم مدیریت مرکزی هوشمند انرژی بوده و همه تأسیسات الکتریکی و مکانیکی درون آن به صورت زمان واقعی مدیریت می‌شوند، مورد توجه است. این سیستم کنترل هوشمند مبتنی بر خواسته‌های تعریف‌شده از سوی بهره‌بردار نسبت به مدیریت انرژی حامل‌های مختلف همانند برق و گاز اقدام می‌کند. فرض شده است این ساختمان در مجاورت یک MSG قرار گرفته باشد. این MSG دارای مولدهای مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی، بادی، سیستم باتری ذخیره‌ساز انرژی به همراه مولدهای دیزل برق است. همچنین، شبکه MSG با شبکه SG دارای ارتباط متقابل بوده و می‌تواند برق را به صورت دوسویه

1. Net-zero Energy Building
2. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
3. Multi Objective Linear Programming
4. Non-cooperative Game Theory

یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه فازی برای مدیریت تولید و مصرف در شبکه‌های هوشمند کوچک انرژی ۵۱

بهره‌برداری از آن‌ها طی یک روز قابل جابه‌جایی است؛ مانند ماشین لباسشویی و ظرفشویی.

۳. بارهای غیرقابل جابه‌جایی در زمان^۳. این بارها به صورت برنامه‌زمانی ثابت و غیر قابل جابه‌جا شدن در ساختمان وجود دارند؛ همانند سیستم‌های حفاظتی و امنیتی و آسانسورها.

جدول (۱): متغیرهای مسئله

متغیر	توضیحات
PL ⁴	مقدار توان تخصیص داده‌شده برای سیستم روشنایی
PT ⁵	مقدار توان تخصیص داده‌شده برای سیستم تنظیم دما
PA ⁶	مقدار توان تخصیص داده‌شده برای سیستم تهویه
PTS ⁷	سیگنال زمان بیشینه مصرف
OL ⁸	شدت نور بیرون
OT ⁹	دمای بیرون
OA ¹⁰	کیفیت هوای بیرون
IL ¹¹	شدت نور داخل
IT ¹²	دمای داخل
PFIXED ¹³	توان مصرفی بارهای غیر قابل جابه‌جایی در زمان
PTSL ¹⁴	توان مصرفی بارهای قابل انتقال در زمان
EPC ¹⁵	قیمت تخمین زده‌شده هر واحد توان
PProvided ¹⁶	توان فراهم‌شده برای ساختمان توسط MSG
PDesired ¹⁷	توان مورد نیاز برای رسیدن به شرایط مطلوب کاربر در ساختمان
PDemand ¹⁸	توان درخواستی سیستم کنترل هوشمند ساختمان

کنترلر توان مصرفی در این ساختمان، از چهار کنترلر فازی مجزا تشکیل شده است. کنترلرهای در نظر گرفته‌شده برای بارهای با قابلیت تغییر توان مصرفی، دارای ساختار مشابه با یکدیگرند. هریک از این سیستم‌های فازی، مقدار توان مطلوب برای سیستم روشنایی/تنظیم دما/تهویه را به همراه هزینه توان انرژی الکتریکی تخمین زده‌شده برای ساختمان را در ورودی گرفته و «نسبت مصالحه قیمت و نیاز» را در خروجی نتیجه می‌دهد. این نسبت در بازه [۱ و ۰/۸] در نظر گرفته شده و نشان‌دهنده میزان مصالحه بین توان مورد نیاز مطلوب و قیمت توان

بادی در سمت MSG و عدم قطعیت در خصوص دمای هوا، شدت نور و کیفیت هوا در سمت مصرف‌کننده نیز به مسئله اضافه شده است.

با توجه به اینکه سیستم در بخش‌های مختلف خود اهداف گوناگون و متضادی دارد، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوطه است. برای این مسئله، پنج تابع هدف شامل میزان رضایت کاربر، هزینه توان مصرفی ساختمان، میزان توان کل مصرفی در زمان بیشینه مصرف، قابلیت اطمینان سیستم MSG و درصد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش‌های مختلف در نظر گرفته شده است.

در این مقاله، بهینه‌سازی چندهدفه بر روی تنظیمات کنترلرهای فازی انجام می‌پذیرد. بدین منظور از یک روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده شده که هدف آن تنظیم پایگاه قواعد کنترلرهای فازی، مبتنی بر توابع هدف تعریف‌شده است.

خروجی نهایی این مقاله، طراحی چندین کنترلر فازی در درون ساختمان و در بخش مدیریت MSG است که می‌تواند بدون نیاز به بهینه‌سازی مجدد و یا دریافت اطلاعات بیشتر، مدیریت تمام بخش‌های مربوطه را مبتنی بر دستیابی به اهداف تعریف‌شده به صورت مستقل و بهینه انجام دهند.

در ادامه، مدل‌های در نظر گرفته‌شده برای ساختمان هوشمند و سیستم مدیریت MSG تعریف شده و پارامترهای معلوم و مجهول هر یک مشخص می‌شوند.

۱.۲. مدل‌سازی ساختمان هوشمند

مدل ساختمان هوشمند در این مقاله به صورت بلوک دیاگرام شکل (۱) در نظر گرفته شده است. توضیحات مربوط به متغیرهای شکل فوق در جدول (۱) آمده است.



شکل (۱): بلوک دیاگرام ساختمان هوشمند

بارهای مورد نظر در ساختمان را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد:

۱. بارهای با قابلیت تغییر توان مصرفی^۱ (شامل سیستم روشنایی، سیستم گرمایش/سرمایش و سیستم تهویه مطبوع).

۲. بارهای قابل انتقال در زمان^۲. مصرف‌کننده‌هایی که زمان

3. Permanent Loads
4. Associated Power for Light System
5. Associated Power for Temperature System
6. Associated Power for Air System
7. Peak Time Signal
8. Outdoor Light
9. Outdoor Temperature
10. Outdoor Air
11. Indoor Light
12. Indoor Temperature
13. Power Of Fixed Loads
14. Power Of Time Shiftable Loads
15. Estimated Power Cost
16. Provided Power For Building
17. Desired Power of Building
18. Demand Power of Building

1. Power-varying Loads
2. Time-shiftable Loads

سیگنال های فوق، فقط دارای دو وضعیت (باینری) هستند. در بلوک دیاگرام نمایش داده شده در شکل (۱)، برای سیستم های روشنایی، تنظیم دما و تهویه ساختمان، مدل هایی فرض شده است که ورودی آن ها میزان توان اختصاص داده شده به آن سیستم و شرایط بیرون بوده و خروجی آن ها شدت نور، درجه حرارت یا کیفیت هوای خارج از ساختمان هستند.

در این مقاله، این مدل ها به صورت ترکیبی خطی از دو ورودی در نظر گرفته شده اند. در این مدل، شدت نور داخل ساختمان (IL) به صورت ترکیب خطی شدت نور خارج از ساختمان (OL) و توان تخصیص داده شده برای سیستم روشنایی (PL) در نظر گرفته می شود. رابطه این مدل به صورت رابطه (۳) است:

$$IL = w_1 * OL + w_2 * P_L \quad (3)$$

کیفیت هوای داخل ساختمان (IA) نیز به صورت ترکیب خطی کیفیت هوای خارج از ساختمان (OA) و توان تخصیص داده شده برای سیستم تهویه (PA) در نظر گرفته می شود. رابطه این مدل به صورت رابطه (۴) است.

$$IA = w_1 * OA + w_2 * P_A \quad (4)$$

مدل در نظر گرفته شده برای سیستم تنظیم دمای ساختمان، اندکی با دو مدل قبلی متفاوت است؛ زیرا در مورد دما گاهی نیاز به افزایش و گاهی نیاز به کاهش دمای محیط است. بنابراین مدل در نظر گرفته شده برای دما دارای پارامتر دیگری به نام دمای مطلوب (DT) نیز می باشد. دمای داخل ساختمان در این مدل از طریق تابع دوضابطه ای شماره (۵) حاصل می شود. مدل بارهای قابل انتقال در زمان دارای ورودی PTSL است که نشان دهنده توان لحظه ای بار مذکور است. خروجی این سیستم نیز کار انجام شده است. در مدل بارهای غیرقابل جابه جایی در زمان، مقدار توان این بارها در هر لحظه مشخص بوده و میزان آن قابل تغییر نیست. خروجی این سیستم نیز کار انجام شده است.

$$IT = \begin{cases} w_1 * OT + w_2 * P_T, & OT < DT \\ w_1 * OT - w_2 * P_T, & OT > DT \end{cases} \quad (5)$$

در شکل (۱) دو توان خروجی و یک توان ورودی به ساختمان در نظر گرفته شده است.

مقدار توان مطلوب برای سیستم شدت روشنایی: این متغیر را می توان با استفاده از مدل سیستم روشنایی، سطح روشنایی خارج از ساختمان و مقدار روشنایی مطلوب کاربر محاسبه کرد.

مقدار توان مطلوب برای سیستم تنظیم دما: این متغیر را می توان با استفاده از مدل سیستم تنظیم دما، دمای خارج از ساختمان و مقدار دمای مطلوب کاربر محاسبه کرد.

مقدار توان مطلوب برای سیستم تهویه: این متغیر را می توان با

فراهم شده برای ساختمان است. با در نظر گرفتن این نسبت، توان نهایی اختصاص داده شده برای هر سیستم به صورت رابطه (۱) قابل محاسبه است:

$$P_{associated} = R_{compromise} * P_{desired} \quad (1)$$

که در آن، $P_{associated}$ نشان دهنده توان تخصیص داده شده توسط کنترلر به بار مورد نظر، $R_{compromise}$ نسبت مصالحه قیمت-نیاز و $P_{desired}$ توان مطلوب مورد نیاز بار است. با در نظر گرفتن بازه [۱ و ۰/۸] برای $R_{compromise}$ به کنترلر اجازه می دهیم تا در مواقع ضرورت (با در نظر گرفتن همه توابع هدف) توان تخصیص داده شده به بار را تا حداکثر ۲۰٪ از مقدار مطلوب پایین تر بیاورد. سیستم فازی از نوع Mamdani بوده و توابع عضویت آن به صورت نرمال و به گونه ای تعریف شده اند که کل فضای تعریف متغیر مورد نظر را پوشش دهند. برای متغیر ورودی PTS که یک سیگنال باینری می باشد، از دو تابع عضویت استفاده شده است. در تابع مذکور، عدد ۱- نشان دهنده مقدار صفر باینری و ۱+ نشان دهنده مقدار یک باینری است. اما برای متغیر ورودی دیگر (Power Cost)، تابع عضویت فازی در نظر گرفته شده است. سایر کنترلر ها نیز مشابه کنترلر فازی سیستم روشنایی تعریف شده اند. همان گونه که مشاهده می شود، نحوه تعریف توابع عضویت در کنترلر ها ثابت فرض شده است ولی قوانین هر کنترلر با استفاده از یک الگوریتم تکاملی چندهدفه و با در نظر گرفتن همه اهداف مورد نظر مسئله، تعیین خواهند شد. کنترلر فازی در نظر گرفته شده برای بارهای قابل انتقال در زمان، دارای ورودی های هزینه توان انرژی الکتریکی تخمین زده شده برای ساختمان و سیگنال پیشینه مصرف است. سیگنال پیشینه مصرف توسط SG تعیین می شود و نشان دهنده زمان پیشینه مصرف در طی روز است. خروجی این کنترلر نیز فرمان فعال شدن بارهای قابل انتقال در زمان LAC می باشد. این متغیر به صورت صفر و یک بوده و برای بارهای قابل انتقال در زمان، روشن و یا خاموش بودن در هر گام زمانی را مشخص می کند. سیگنال توان لحظه ای اختصاص داده شده به این بارها مطابق رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$P_{TSL} = LAC * P_0 \quad (2)$$

که در آن، P_0 یک عدد ثابت بوده و نشان دهنده میزان توان مصرفی بار در زمان روشن بودن است. با ضرب این عدد ثابت در سیگنال باینری LAC، توان لحظه ای P_{TSL} حاصل می شود. توابع عضویت فازی ورودی EPC این سیستم مشابه سایر کنترلر های فازی قبلی در نظر گرفته شده است. اما برای ورودی PTS و خروجی LAC، از ۲ تابع عضویت گوسی با میانگین های ۱ و ۱- استفاده شده است؛ زیرا

1. Load Activation Command

شده است. این سیستم فازی مقادیر قیمت لحظه‌ای هر منبع را در ورودی گرفته و با در نظر گرفتن تمام توابع هدف، به هریک از منابع به صورت لحظه‌ای امتیاز می‌دهد. این امتیاز که در بازه [۰,۱] قرار دارد، مشخص می‌کند که برای تأمین توان مورد نیاز ساختمان، در هر لحظه اولویت استفاده از منابع به چه صورت است. سیستم فازی دارای ۵ ورودی است که قیمت لحظه‌ای توان الکتریکی هر منبع را مشخص می‌کنند. خروجی‌های سیستم نیز امتیاز هر منبع هستند. در اینجا نیز توابع عضویت متغیرها، گوسی ثابت و با مراکز بکخواخت در بازه تعریف هر متغیر، در نظر گرفته شده است. قیمت و مقدار انرژی الکتریکی قابل خرید از SG به صورت لحظه‌ای مشخص است. قیمت انرژی الکتریکی دیزل ژنراتور نیز وابسته به قیمت سوخت بوده و مشخص است. اما در مورد قیمت برق منابع سلول خورشیدی و توربین بادی، موضوع متفاوت است. اگر هزینه کل تعمیر و نگهداری سالیانه را برای این منابع مقداری ثابت در نظر بگیریم، بنابراین قیمت تمام‌شده انرژی الکتریکی در این منابع به توانایی تولید آن‌ها بستگی دارد. میزان تولید این منابع نیز ثابت نبوده و به شدت تابش نور خورشید و همچنین شدت وزش باد وابسته است. مدل قیمتی در نظر گرفته شده برای این منابع به صورت رابطه (۷) است.

$$Price = \frac{P_{produced}}{RMC} \quad (7)$$

که در آن، متغیر Price هزینه توان تولیدی توسط منبع برحسب کیلووات بر ساعت است. $P_{produced}$ نیز توان تولیدشده توسط منبع (برحسب کیلووات) در هر ساعت و RMC هزینه تعمیر و نگهداری در هر ساعت است. از هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه می‌توان به هزینه ساعتی رسید. برای محاسبه هزینه توان قابل برداشت از باتری، دو عامل هزینه تعمیر و نگهداری باتری و منابعی که باتری را شارژ کرده‌اند، تأثیرگذار هستند.

برای محاسبه قیمت توان هر واحد از انرژی الکتریکی موجود در باتری، با در نظر گرفتن قیمت منابعی که در شارژ باتری تأثیرگذار بوده‌اند، برای کل توان موجود در باتری یک هزینه کلی در نظر گرفته شده است. بدیهی است که این هزینه در صورت خالی بودن باتری، صفر خواهد بود. دو سناریوی مختلف برای باتری وجود دارد:

۱. در هنگام شارژ باتری، قیمت کل توان موجود در باتری به صورت

رابطه (۸) به روز می‌شود.

$$TotalCost(t+1) = TotalCost(t) + P_{Charging} * SourcePrice \quad (8)$$

که در آن، نشان‌دهنده هزینه کل توان صرف‌شده برای شارژ باتری است. $P_{Charging}$ مقدار توان صرف‌شده در لحظه t برای شارژ باتری و SourcePrice قیمت هر واحد از این توان است.

۲. در هنگام دشارژ باتری نیز قیمت کل توان موجود در باتری

استفاده از مدل سیستم تهویه، کیفیت هوای خارج از ساختمان و کیفیت هوای مطلوب کاربر محاسبه کرد. کنترلر هوشمند داخل ساختمان با انجام مصالحه‌ای بین قیمت تمام‌شده هر واحد انرژی الکتریکی و شرایط مطلوب کاربر، توانی را به هر بار اختصاص می‌دهد که می‌تواند کوچک‌تر یا مساوی با مقدار توان مطلوب آن بار باشد. مقدار P_{Demand} کل ساختمان به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$P_{Demand} = P_L + P_T + P_A + P_{fixed} + P_{TSL} \quad (6)$$

$P_{Provided}$ مقدار توانی است که سیستم مدیریت بهره‌برداری از منابع MSG برای ساختمان مورد نظر تأمین کرده است. این مقدار بسته به توان قابل تولید توسط MSG یا قابل خرید با صرفه اقتصادی از SG، می‌تواند مقداری کمتر مساوی از P_{Demand} داشته باشد.

۲.۲. سیستم رتبه‌بندی مولدهای انرژی درون MSG

سیستم فازی رتبه‌بندی مولدهای انرژی درون MSG به صورت شکل (۲) در نظر گرفته شده است. این سیستم با گرفتن همه قیمت‌های لحظه‌ای در ورودی و استفاده از قوانینی که با کمینه کردن تمام توابع برازندگی حاصل شده‌اند، مولدها یا منابع انرژی را برای بهره‌برداری در هر لحظه رتبه‌بندی می‌کند. توضیحات مربوط به متغیرهای این شکل در جدول (۲) آمده است.



شکل (۲): سیستم فازی رتبه‌بندی مولدهای انرژی درون MSG

جدول (۲): متغیرهای مسئله

متغیر	توضیحات
Prsun ¹	هزینه توان الکتریکی تولیدی سلول خورشیدی
Prwind ²	هزینه توان الکتریکی توربین بادی
Prdiesel ³	هزینه توان الکتریکی تولیدی دیزل ژنراتور
PrSG ⁴	هزینه توان الکتریکی قابل خرید از SG
PrBattery ⁵	هزینه توان قابل دریافت از باتری
Ranking ⁶	رتبه‌بندی لحظه‌ای منابع یا مولدهای انرژی برای بهره‌برداری

برای رتبه‌بندی منبع نیز از سیستم فازی نوع Mamdani استفاده

1. Solar Source Power Price
2. Wind Source Power Price
3. Diesel Source Power Price
4. Smart Grid Power Price
5. Battery Power Price
6. Resource Ranking

به صورت رابطه (۹) قابل محاسبه است:

$$TotalCost(t+1) = TotalCost(t) - P_{Discharging} * SourcePrice \quad (9)$$

در رابطه فوق نیز $P_{Discharging}$ مقدار توان اخذشده از باتری در لحظه t است. در نهایت با در نظر گرفتن $TotalCost$ و هزینه تعمیر و نگهداری باتری، قیمت توان لحظه‌ای هر واحد انرژی الکتریکی قابل برداشت از باتری به صورت رابطه (۱۰) قابل محاسبه است:

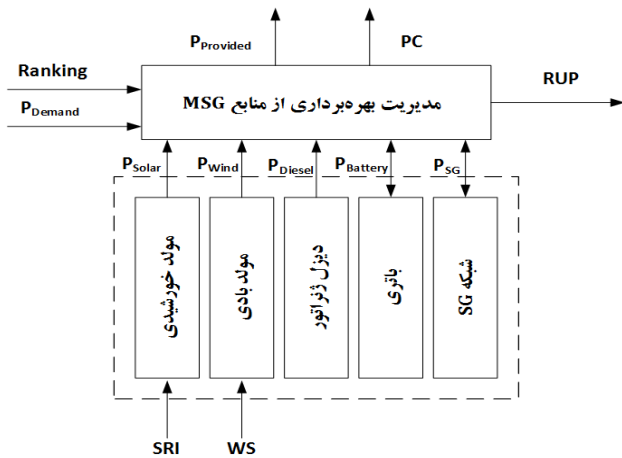
$$Pr_{Battery} = \frac{TotalCost}{P_{Total}} + RMC \quad (10)$$

که در آن، P_{Total} نشان‌دهنده توان کل موجود در باتری و RMC هزینه تعمیر و نگهداری در هر ساعت است. از هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه می‌توان به هزینه ساعتی رسید. در نهایت، خروجی سیستم فازی رتبه‌بندی مولدهای انرژی درون MSG یک عدد در بازه $[0,1]$ به‌ازای هر یک از منابع موجود خواهد بود. بنابراین تمام منابع با استفاده از این امتیازها قابل رتبه‌بندی خواهند بود.

۳.۲. مدل‌سازی سیستم مدیریت بهره‌برداری از منابع MSG

سیستم انتخاب منبع به صورت شکل (۳) در نظر گرفته شده است. این سیستم با در نظر گرفتن همه قیمت‌های لحظه‌ای و همچنین تمام اهداف مسئله، تصمیم می‌گیرد که چه موقع از کدام منبع استفاده شود. توضیحات مربوط به متغیرهای شکل فوق در جدول (۳) آمده است. این سیستم با استفاده از رتبه‌بندی منابع تولیدشده توسط سیستم فازی مربوطه، میزان سهم تولید هر کدام از منابع و یا خرید/فروش از/به شبکه SG و شارژ/دشارژ باتری را تعیین می‌کند. در سیستم فوق برای شارژ باتری از انرژی الکتریکی استفاده نشده (سرریز) منابع خورشیدی و بادی بهره گرفته می‌شود. اما تصمیم‌گیری در مورد اینکه چه مقدار از انرژی مذکور صرف شارژ باتری شده و چه مقدار به شبکه SG فروخته شود، بر عهده سیستم فازی می‌باشد. این سیستم با استفاده از رتبه‌بندی منابع تولیدشده توسط سیستم فازی مربوطه، میزان سهم تولید هر کدام از منابع و یا خرید/فروش از/به شبکه SG و شارژ/دشارژ باتری را تعیین می‌کند. در سیستم فوق برای شارژ باتری از انرژی الکتریکی استفاده نشده (سرریز) منابع خورشیدی و بادی بهره گرفته می‌شود. اما تصمیم‌گیری درباره اینکه چه مقدار از انرژی مذکور صرف شارژ باتری شده و چه مقدار به شبکه SG فروخته شود، بر عهده سیستم فازی می‌باشد. این سیستم یک سیستم فازی از نوع Mamdani بوده و قیمت تمام شده هر واحد از انرژی الکتریکی تولیدشده توسط MSG را در ورودی گرفته و یک عدد در بازه $[0,1]$ را به عنوان ضریب شارژ باتری در خروجی نتیجه می‌دهد. توابع عضویت متغیرها، گوسی ثابت در نظر گرفته شده است که مراکز آن با فواصل یکسان از یکدیگر در بازه ممکن برای قیمت توان

تعریف شده‌اند. شش تابع عضویت برای این متغیر در نظر گرفته شده است. به صورت مشابه برای خروجی نیز از توابع گوسی استفاده شده است، با این تفاوت که بازه تعریف آن‌ها $[0,1]$ است.



شکل (۳): مدیریت بهره‌برداری از منابع MSG

جدول (۳): متغیرهای مسئله

متغیر	توضیحات
PC^1	هزینه هر واحد توان انرژی الکتریکی فراهم شده برای ساختمان
RUP^2	درصد استفاده از منابع تولید انرژی
SRI^3	شدت تابش نور به سطح سلول خورشیدی
WS^4	سرعت باد در محیط مولد بادی
PSG^5	توان مبادله شده با شبکه SG
$PBattery^6$	توان مبادله شده با باتری
$PDiesel^7$	توان دریافت شده از دیزل
$PWind^8$	توان دریافت شده از مولد بادی
$PSolar^9$	توان دریافت شده از مولد خورشیدی
$PProvided^{10}$	توان فراهم شده برای ساختمان توسط MSG
$PDemand^{11}$	توان درخواستی سیستم کنترل هوشمند ساختمان

قوانین سیستم فوق نیز توسط الگوریتم تکاملی و با در نظر گرفتن تمام اهداف مسئله حاصل می‌شوند. در نهایت، خروجی این سیستم یک عدد در بازه $[0,1]$ خواهد بود که در هر گام زمانی مشخص می‌کند که چه مقدار از انرژی الکتریکی سرریز، صرف شارژ باتری شود. برای مثال، اگر مقدار خروجی $0/2$ باشد، 20% از این انرژی صرف شارژ شده

1. Power Cost
2. Resource Usage Percentage
3. Solar Radiation Intensity
4. Wind Speed
5. SG Power
6. Battery Power
7. Diesel Power
8. Wind Power
9. Solar Power
10. Provided Power for Building
11. Demand Power of Building

یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه فازی برای مدیریت تولید و مصرف در شبکه‌های هوشمند کوچک انرژی ۵۵

نظر گرفته شده است. در رابطه (۱۵)، ارتباط این سه عامل با مسئله درجه آسایش ساکنان داخل ساختمان نمایش داده شده است. یکی از اهداف مسئله، تنظیم پارامترهای نامشخص مدل به گونه‌ای است که مقدار Comfort بیشینه شود [۳۸].

$$Comfort = \sigma_1 \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{Thermal}}{Temp_{set}} \right)^2 \right] + \sigma_2 \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{lux}}{Lux_{set}} \right)^2 \right] + \sigma_3 \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{CO2I}}{AQ_{set}} \right)^2 \right] \quad (15)$$

عوامل تأثیرگذار در این رابطه عبارت‌اند از:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	ضرایب تعریف‌شده توسط کاربر بین صفر و یک و با مجموع یک
$Temp_{set}$	نقطه دمایی مطلوب داخل ساختمان
Lux_{set}	میزان نور مطلوب داخل ساختمان
AQ_{set}	کیفیت هوای مطلوب داخل ساختمان
$\epsilon_{Thermal}$	تفاوت بین نقطه تنظیم مطلوب و مقدار واقعی دما
ϵ_{lux}	تفاوت بین نقطه تنظیم مطلوب و مقدار واقعی نور
ϵ_{CO2}	تفاوت بین نقطه تنظیم مطلوب و مقدار واقعی کیفیت هوا

۲.۵.۲. هزینه توان مصرفی کل ساختمان (FTPC)

تولید انرژی الکتریکی در شبکه MSG هزینه‌بر است. همچنین در مواقعی ممکن است مجبور به خرید برق از شبکه SG شویم. از سوی دیگر، در برخی از مواقع مولدهای خورشیدی و بادی بیشتر از حد نیاز، تولید دارند و یا هزینه تولید آن‌ها به حدی است که فروش آن‌ها به صرفه‌تر است. با در نظر گرفتن همه این موارد، هزینه کل انرژی الکتریکی مورد استفاده در ساختمان را می‌توان به صورت رابطه (۱۶) محاسبه کرد:

$$TotalPower\ Cost = \sum (P_{produced} + P_{bought}) - \sum P_{sold} \quad (16)$$

همان گونه که از رابطه فوق پیداست، هزینه کل توان تولیدی از مجموع هزینه توان تولیدشده ($P_{produced}$) به علاوه توان خریداری شده از SG (P_{bought}) حاصل می‌شود؛ که البته توان فروخته شده به SG (P_{sold}) از این مقدار کم می‌شود. مشخص است که هدف کاهش هزینه و در نتیجه کمینه شدن تابع هدف فوق با تنظیم مناسب قوانین سیستم‌های فازی مدل است. این کار توسط الگوریتم تکاملی چندهدفه انجام می‌شود.

۳.۵.۲. میزان توان کل مصرفی در زمان بیشینه مصرف (FTPP)

این تابع هدف، مقدار کل توان مصرف شده توسط ساختمان در زمان بیشینه مصرف است. در اینجا هدف، کمینه کردن تابع فوق و در نتیجه کاهش مقدار مصرف ساختمان در زمان بیشینه است.

۴.۵.۲. قابلیت اطمینان سیستم MSG

قابلیت اطمینان یکی از اهداف مهم در شبکه‌های MSG می‌باشد که هدف آن کاهش احتمال قطع برق منبع تولید انرژی است. این تابع هدف

و ۸۰٪ از آن به SG فروخته خواهد شد. فرایند شارژ در رابطه (۱۱) و دشارژ باتری مطابق رابطه (۱۲) انجام می‌شود. در روابط فوق، E_B نشان‌دهنده انرژی باتری، η_{BC} و η_{BD} به ترتیب نرخ شارژ و دشارژ باتری هستند. این اعداد به طور معمول ۹۰٪ و ۸۵٪ فرض می‌شود. σ نیز نرخ نشستی باتری را نشان می‌دهد که معمولاً برای باتری‌ها ۰/۲ درصد در نظر گرفته می‌شود. قید در نظر گرفته شده برای این روابط نیز به صورت رابطه (۱۳) است:

$$E_B(t+1) = E_B(t)(1-\sigma) + surpluspower \times \eta_{BC} \quad (11)$$

$$E_B(t+1) = E_B(t)(1-\sigma) - defectpower / \eta_{BD} \quad (12)$$

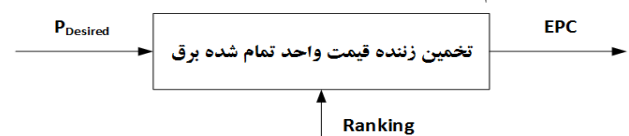
$$E_{B,min} \leq E_B(t) \leq E_{B,max} \quad (13)$$

در این رابطه، $E_{B,min}$ و $E_{B,max}$ به ترتیب مقادیر بیشینه و کمینه انرژی قابل ذخیره در باتری هستند. توجه به این نکته ضروری است که در صورت عدم شارژ و یا دشارژ باتری و با توجه به در نظر گرفتن ضریب نشستی باتری، مقداری هدررفت انرژی خواهیم داشت. این قضیه در رابطه (۱۴) نمایش داده شده است:

$$E_B(t+1) = E_B(t)(1-\sigma) \quad (14)$$

۴.۲. مدل‌سازی تخمین‌زننده قیمت واحد تمام شده برق

سیستم تخمین‌زننده قیمت واحد تمام شده برق به صورت شکل (۴) است. این سیستم با استفاده از رتبه‌بندی مشخص شده منابع و توان مورد نیاز کل ساختمان، قیمت واحد تمام شده برق را برای استفاده در کنترلرهای سیستم مدیریت هوشمند ساختمان، تخمین می‌زند. با توجه به اینکه معمولاً $P_{Desired}$ از P_{Demand} بیشتر یا مساوی می‌باشد، قیمت فوق تقریبی است از قیمت تمام شده واقعی انرژی که در مرحله بعدی محاسبه می‌شود. این محاسبه فقط برای تولید یک متغیر کمکی برای استفاده در سیستم مدیریت هوشمند ساختمان است.



شکل (۴): سیستم تخمین‌زننده قیمت واحد تمام شده برق

۵.۲. توابع هدف

هدف این مقاله انتخاب قوانین مناسب برای سیستم‌های فازی به گونه‌ای است که تمام اهداف مسئله در نظر گرفته شوند. در ادامه، هریک از اهداف مسئله شرح داده می‌شوند.

۱.۵.۲. میزان رضایت کاربر (FComfort)

در داخل یک ساختمان هوشمند برای دستیابی به رفاه مورد نظر ساکنان، سه عامل مهم حرارت، نور و کیفیت هوا به عنوان متغیرهای اصلی در

در رابطه (۱۷) نمایش داده شده است:

$$LPSP = \frac{\sum (P_L - P_{PV} - P_{WT} + P_{Soc,Min} + P_D)}{\sum P_L} \quad (17)$$

تابع هدف فوق احتمال قطع برق در سیستم MSG را مشخص می‌کند. هدف کمینه کردن تابع هدف فوق است.

۵.۵.۲. درصد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر

یکی از اهداف مهم در چنین سیستم‌هایی، کمینه کردن میزان آلاینده‌های طبیعی و گازهای گلخانه‌ای است. در رابطه (۱۸) تابع هدف نمایش داده شده است. این تابع نیز باید بیشینه شود.

$$RF(\%) = \left(1 - \frac{\sum P_D}{\sum P_{PV} + P_{WT}}\right) \times 100 \quad (18)$$

۳. عدم قطعیت

عدم قطعیت‌های در نظر گرفته‌شده در این مقاله به دو دسته عدم قطعیت سمت مصرف‌کننده و سمت تولیدکننده تقسیم می‌شوند.

۱.۳. عدم قطعیت سمت تولیدکننده

عدم قطعیت‌های در نظر گرفته‌شده / سمت تولیدکننده بدین صورت‌اند:

- شدت تابش نور به سطح سلول خورشیدی (SRI)
- سرعت وزش باد در محیط توربین بادی (WS)

متغیرهای SRI و WS به‌صورت تصادفی در نظر گرفته شده‌اند که

به‌ترتیب دارای تابع توزیع احتمال نرمال و Weibull می‌باشند. شایان ذکر است که این متغیرها نیز به‌صورت غیرایستا^۳ در نظر گرفته شده‌اند بدین معنا که پارامترهای توابع توزیع آن‌ها، متغیر با زمان می‌باشند. توابع توزیع چگالی احتمال متغیر SRI به‌صورت توابع نرمال در نظر گرفته شده و مقادیر میانگین و انحراف از معیار آن در هر ساعت از شبانه‌روز مطابق جدول (۴) است. بدیهی است برای ساعت‌هایی که این مقادیر گزارش نشده، مقدار تابش نور خورشید ناچیز در نظر گرفته شده است [۳۹]. رابطه PDF^۴ نرمال به‌صورت رابطه (۱۹) است که در آن μ و σ به‌ترتیب نشان‌دهنده مقادیر میانگین و انحراف از معیار تابع نرمال هستند:

$$y = f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (19)$$

جدول (۴): مقادیر میانگین و انحراف از معیار تابش خورشید در هر ساعت

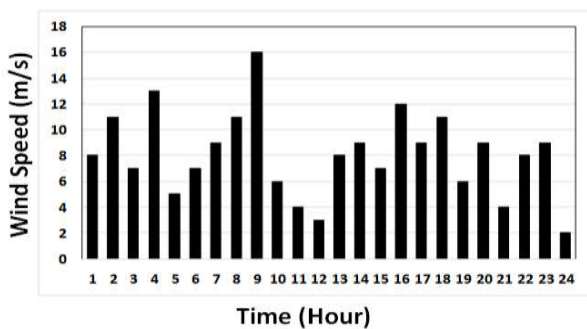
از شبانه‌روز

ساعت	$\mu(\frac{kW}{m^2})$	$\sigma(\frac{kW}{m^2})$	ساعت	$\mu(\frac{kW}{m^2})$	$\sigma(\frac{kW}{m^2})$
۸	۰/۲۲	۰/۱۸۲	۱۳	۰/۶۴۸	۰/۲۸۲
۹	۰/۳۸۱	۰/۲۱۷	۱۴	۰/۵۹۰	۰/۲۳۵
۱۰	۰/۵۱۱	۰/۲۵۳	۱۵	۰/۴۷۷	۰/۲۳۷
۱۱	۰/۶۱۰	۰/۲۷۳	۱۶	۰/۳۳۸	۰/۲۰۴
۱۲	۰/۶۵۷	۰/۲۸۴	۱۷	۰/۱۹۰	۰/۱۶۳

با در نظر گرفتن توابع PDF گوسی مطابق جدول فوق، مشاهده می‌شود که سیگنال شدت تابش نور خورشید در هر ساعت دارای یک تابع PDF با شکل متفاوت خواهد شد و سیگنال نهایی حاصل به‌صورت غیرایستا می‌شود.

برای شدت سرعت وزش باد از تابع Weibull PDF استفاده شده که رابطه آن به‌صورت (۲۰) است. در رابطه فوق، مقدار $a = v_{mean} / 0.9$ و $b = 2$ در نظر گرفته شده است. مقادیر v_{mean} نیز در هر لحظه از زمان به‌صورت شکل (۵) در نظر گرفته شده است. این مقادیر که برای هر ناحیه جغرافیایی متفاوت است، سرعت متوسط وزش باد در هر یک از ساعات شبانه‌روز در روزهای مختلف را نشان می‌دهد [۴۰].

$$f_w(v) = ba^{-b} v^{b-1} e^{-\left(\frac{v}{a}\right)^b} \quad (20)$$



شکل (۵): مقادیر سرعت باد در هر لحظه از زمان

۲.۳. عدم قطعیت سمت مصرف‌کننده

عدم قطعیت‌های در نظر گرفته‌شده سمت مصرف‌کننده عبارت‌اند از:

- شدت نور در فضای بیرون از ساختمان (OL);
- دمای فضای بیرون از ساختمان (OT);
- کیفیت هوا در فضای بیرون از ساختمان (OA).

سیگنال‌های فوق نیز به‌صورت متغیرهای تصادفی غیرایستا هستند. شدت نور خارج از ساختمان دارای تابع توزیع مشابه شدت تابش نور

5. Outdoor Light
6. Outdoor Temperature
7. Outdoor Air

1. Sun Radiation Intensity
2. Wind Speed
3. Non-stationary
4. Probability Density Function

یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه فازی برای مدیریت تولید و مصرف در شبکه‌های هوشمند کوچک انرژی ۵۷

به صورت ثابت فرض شده و بهینه‌سازی فقط بر روی مقادیر توان مورد نیاز بارها به صورت مستقیم انجام شده است. در ادامه می‌خواهیم استراتژی پیشنهادی را با روش این مقالات مقایسه کنیم. برای این کار تمام کنترلرها را از مدل حذف کرده‌ایم. به طور دقیق‌تر، کنترلرهای مدیریت ساختمان هوشمند، رتبه‌بندی استفاده از منابع درون MSG و کنترلر مدیریت شارژ باتری حذف شده‌اند. اما بازهم مسئله مشابه قبل به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفته شده است. لیست متغیرهایی که باید بهینه شوند، در جدول (۵) قابل مشاهده است.

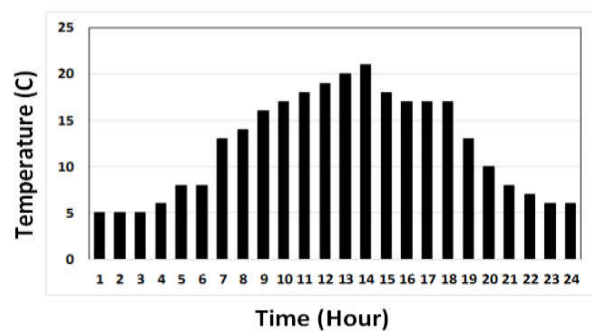
جدول (۵): متغیرهای مسئله بهینه‌سازی چندهدفه	
متغیر	توضیحات
PL	مقدار توان تخصیص داده شده برای روشنایی ساختمان در هر ساعت
PT	مقدار توان تخصیص داده شده برای سیستم سرمایش/گرمایش ساختمان در هر ساعت
PA	مقدار توان تخصیص داده شده برای سیستم تهویه مطبوع ساختمان در هر ساعت
Ranking	اولویت‌بندی استفاده از منابع درون MSG و SG در هر ساعت

برای انجام مقایسه دقیق بین الگوریتم پیشنهادی و استراتژی سایر مقالات، مسئله برای ۲۴ ساعت توسط هر دو روش حل و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. گام زمانی ۱ ساعت در نظر گرفته شده است؛ بنابراین در این ۲۴ ساعت برای هر یک از متغیرهای P_L ، P_T و P_A ، ۲۴ مقدار مختلف وجود دارد که باید توسط الگوریتم تکاملی بهینه شوند. اما در مورد متغیر Ranking باید اولویت‌بندی را برای همه منابع موجود در هر ساعت داشت؛ بنابراین این متغیر، یک ماتریس 5×24 است.

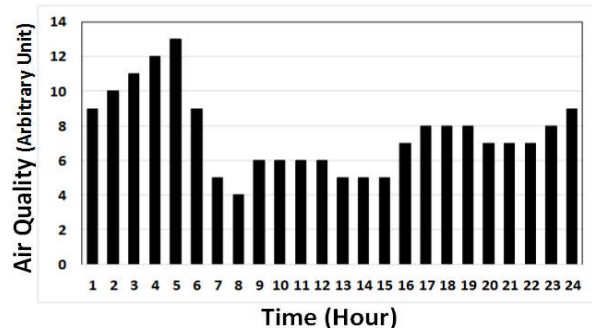
مدل ارائه شده با فرضیات و سیگنال‌های مذکور و اهداف تعیین شده در اختیار الگوریتم NSGAIII قرار گرفته تا قوانین بهینه برای کنترلرهای فازی حاصل شوند. این بهینه‌سازی به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که هر یک از اهداف تا حد ممکن در بهترین وضعیت خود باشند؛ اگرچه ممکن است که بعضی از اهداف با یکدیگر در تضاد بوده و در نهایت مصالحه‌ای بین آن‌ها صورت گیرد.

در اولین مرحله، جمعیت اولیه در نسل اول به صورت تصادفی تولید می‌شود. پس از تولید نسل اول، به ارزیابی جواب‌های تولیدشده در این نسل پرداخته می‌شود. این ارزیابی بر اساس توابع هدفی است که تعریف شده‌اند. جواب‌های واقع شده در جبهه‌های دارای سطح یک تا سطحی که تأمین‌کننده تعداد کروموزوم مورد نیاز در جمعیت باشد، انتخاب شده و سایر کروموزوم‌ها حذف می‌شوند. برای تولید نسل بعد، از عملگرهای تقاطع و جهش استفاده می‌شود. برای تولید نسل نیز از استراتژی انتخاب مسابقه‌ای بر اساس ازدحام استفاده می‌شود. این الگوریتم از فاصله ازدحامی برای به دست آوردن جبهه جواب یکنواخت‌تر نسبت به سایر

بر سطح سلول خورشیدی است که در قسمت قبل توضیح داده شد. ولی برای دو متغیر دما و کیفیت هوای فضای بیرون ساختمان از تابع PDF Weibull استفاده شده است. مقادیر متوسط این سیگنال‌ها نیز به صورت شکل‌های (۶) و (۷) در نظر گرفته شده است. در این روش مدل‌سازی، متغیرها به عدم قطعیت موجود در طبیعت نزدیک‌تر می‌شوند. در نتیجه با توجه به مدل در نظر گرفته شده برای ساختمان، عدم قطعیت متغیرهای فوق، منجر به ایجاد عدم قطعیت در توان‌های مصرفی P_L ، P_T و P_A می‌شود. شایان ذکر است که بسته به منطقه جغرافیایی، می‌توان مقادیر متوسط و انحراف از معیار همه متغیرهای دارای عدم قطعیت را برای هر فصل یا هر ماه به صورت مجزا در نظر گرفت و با این کار به کنترلرهای اختصاصی برای هر دوره زمانی از سال رسید.



شکل (۶): مقادیر متوسط در نظر گرفته شده برای دما در هر ساعت از شبانه‌روز

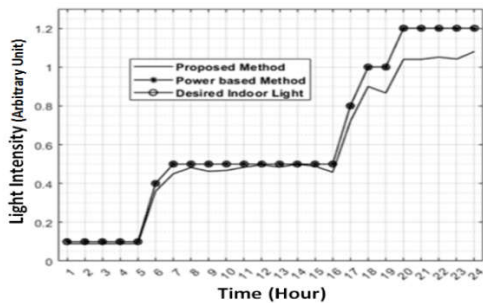


شکل (۷): مقادیر متوسط در نظر گرفته شده برای کیفیت هوا در هر ساعت از شبانه‌روز

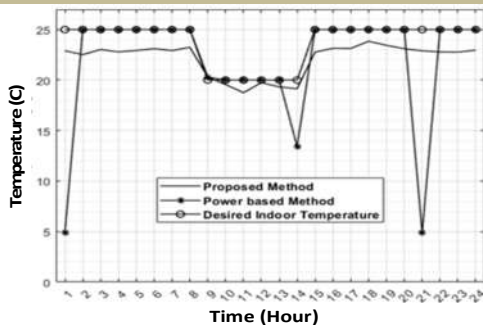
۴. نتایج تجربی

برای پیاده‌سازی مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مورد نظر از نرم‌افزار Matlab R2018a استفاده شده است. در روش پیشنهادی، هدف استفاده از کنترلرهایی است که وظیفه تخصیص توان و انتخاب منبع مناسب را با توجه به وضعیت قیمت، بیشینه توان و شرایط مطلوب کاربر انجام دهند. این کار با استفاده از کنترلرهای فازی انجام شده که قوانین آن‌ها توسط الگوریتم تکاملی چندهدفه بهینه شده است. اما در بسیاری از مطالعات قبلی، شرایط مسئله در یک دوره زمانی محدود

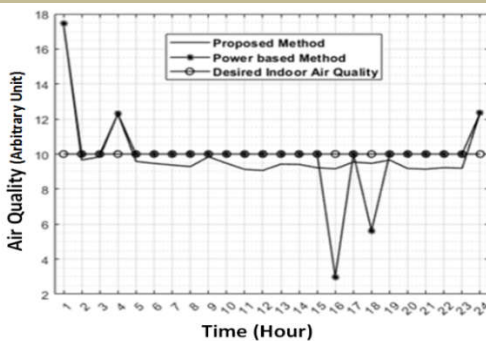
نظر گرفتن سایر توابع هدف، مقداری کمتر از مقدار مطلوب قرار داده است. برای دو متغیر دما، در شکل (۱۰) و کیفیت هوای داخل ساختمان در شکل (۱۱) نیز همان گونه که از نمودارهای آن‌ها مشخص است، روش بر مبنای توان در اکثر ساعات مقدار را برابر مقدار مطلوب کاربر قرار داده است. از سوی دیگر، روش پیشنهادی در همه ساعات اختلاف حداکثر ۲۰ درصدی خود را با مقادیر مطلوب بسته به وضعیت قیمت انرژی و بیشینه بار حفظ کرده است. از آنجایی که در سیستم‌های ساختمان هوشمند، به کنترلرها اجازه داده می‌شود برای صرفه‌جویی انرژی، تا حدی دما، روشنایی و کیفیت هوا را متفاوت با نقطه مورد نظر کاربر تنظیم کنند، در این شبیه‌سازی نیز به کنترلرهای فازی این امکان داده شده است که تا حدی نسبت به نقطه دلخواه کاربر، سیستم را بالاتر یا پایین‌تر تنظیم کنند. بدیهی است این درجه آزادی می‌تواند کمتر، بیشتر یا حذف شود.



شکل (۹): مقایسه شدت نور داخل ساختمان حاصل شده در روش پیشنهادی در کنار نتیجه استراتژی بر مبنای توان



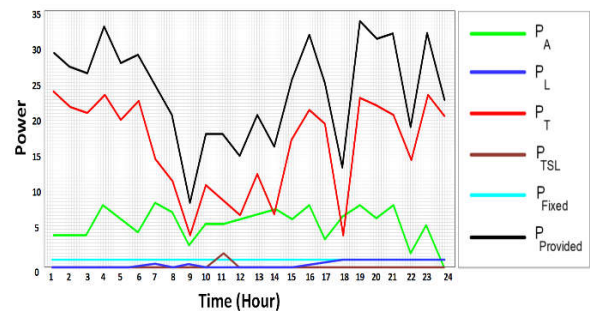
شکل (۱۰): مقایسه دمای هوای داخل ساختمان حاصل شده در روش پیشنهادی در کنار نتیجه استراتژی بر مبنای توان



شکل (۱۱): مقایسه کیفیت هوای داخل ساختمان حاصل شده در روش پیشنهادی در کنار نتیجه استراتژی بر مبنای توان

الگوریتم‌ها و تخمین ازدحام نقاط، حول جواب‌ها استفاده می‌کند. استفاده از عامل فاصله ازدحامی برای انتخاب بهتر جواب‌ها از نظر پراکندگی بر روی یک جبهه است. مسئله برای ۳۰۰ نسل از الگوریتم NSGAI حل شده است.

در شکل (۸) همه توان‌های تخصیص داده شده برای بارهای مختلف داخل ساختمان در کنار توان کل فراهم شده برای آن، نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که کمترین میزان توان برای بارهای ثابت بوده و بار با قابلیت شیفت زمانی نیز فقط در ساعت ۱۱ فعال شده که زمان اوج مصرف نیست. برای سه بار دیگر، بیشترین مقدار توان صرف سیستم سرمایش/گرمایش و پس از آن سیستم تهویه مطبوع شده است، سیستم روشنایی نیز با اختلاف زیادی توان کمتری از دو بار دیگر مصرف کرده است. مقادیر توابع هدف برای حالت الگوریتم پیشنهادی و استراتژی سایر مقالات در جدول (۶) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که استفاده از روش پیشنهادی در چهار تابع از پنج تابع هدف منجر به جواب بهتری شده است.



شکل (۸): نمایش همه توان‌های تخصیص داده شده برای بارهای مختلف داخل ساختمان در کنار توان کل فراهم شده برای آن

جدول (۶): مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با روش‌های موجود

تابع هزینه	روش پیشنهادی	استراتژی سایر مقالات
FComfort	۱/۰۷	۳/۰۲
FTPC	$۱۰^۲ \times ۲/۴۵$	$۱۰^۳ \times ۱/۰۵$
FTPP	$۱۰^۲ \times ۴/۲۰$	$۱۰^۳ \times ۲/۹۶$
LPSP	۲۵/۴۹	۱۴/۲۸
RF	۰/۷۷	۰/۵۵

در شکل‌های (۹) تا (۱۱) وضعیت دما، نور و کیفیت هوای داخل ساختمان برای الگوریتم پیشنهادی با روش بر مبنای توان، مقایسه شده است. نتایج روش پیشنهادی با خط مشکی و نتایج روش بر مبنای توان با خط سبز در کنار مقادیر مطلوب کاربر نمایش داده شده است. همان گونه که در شکل (۹) قابل مشاهده است، روش بر مبنای توان در تمام ۲۴ ساعت مقادیر نور را منطبق بر مقدار مطلوب کاربر قرار داده، اما برای روش پیشنهادی در بعضی از ساعات مقدار شدت نور را با در

۵. نتیجه‌گیری

آلاینده‌های زیست‌محیطی در نظر گرفته شدند و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGAI حل شدند. همچنین روش پیشنهادی با استراتژی سایر مقالات که متغیرهای تصمیم‌گیری آن‌ها به‌طور مستقیم توان تخصیص داده‌شده به هر بار می‌باشد، نیز مقایسه شد و نتایج تجربی، نشان‌دهنده نتایج قابل قبول روش پیشنهادی نسبت به روش مقالات قبلی است. از سوی دیگر با در نظر گرفتن کنترلرهای فازی، مدل پیشنهادی قابلیت استفاده در زمان‌های دیگر را نیز خواهد داشت درحالی‌که در استراتژی مقالات قبلی بهینه‌سازی فقط در یک بازه زمانی ثابت با شرایط از قبل مشخص شده، صورت گرفته است.

از جمله اقداماتی که در جهت تکمیل این مقاله قابل انجام است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اضافه کردن تعداد ساختمان‌ها در داخل یک MSG به‌عنوان مصرف‌کننده‌هایی با الگوهای مصرف مختلف و بهینه کردن آن‌ها به‌صورت یکپارچه؛
- تغییر مشخصات کنترلرهای هوشمند فازی در بخش‌های مختلف سیستم و در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر کنترلی؛
- اضافه کردن بحث بازار برق در مرز مشترک خرید/فروش برق بین SG و MSG و بهره‌گیری از روش‌های حاکم در بازار برق؛
- مدیریت انرژی مصرفی تجهیزات و تأسیسات داخل ساختمان هوشمند؛
- مدیریت مصرف چندین مصرف‌کننده مختلف درون یک MSG؛
- مدیریت چندین مولد انرژی تجدیدپذیر در ترکیب با مولدهای فسیلی و ذخیره‌کننده‌های انرژی؛
- مدیریت ارتباط دوسویه سیستم SG با MSG.

در این مقاله، مدیریت یکپارچه ساختمان‌های هوشمند در یک MSG متصل به یک SG بررسی شد. در این راستا، مدیریت انرژی مصرفی تجهیزات و تأسیسات داخل ساختمان هوشمند، مدیریت مصرف چندین مصرف‌کننده مختلف درون یک MSG، مدیریت چندین مولد انرژی تجدیدپذیر در ترکیب با مولدهای فسیلی و ذخیره‌کننده‌های انرژی و مدیریت ارتباط دوسویه سیستم SG با MSG مورد توجه قرار گرفت. در مدل پیشنهادی، کنترلرهای فازی ابتدا بر اساس الگوریتم تکاملی NSGAI و بر اساس تمام قوانین حاکم بر سیستم، مورد بهینه‌سازی قرار گرفته و سپس به‌صورت مستقل و بدون نیاز به بهینه‌سازی مجدد بر اساس تغییر شرایط حاکم بر سیستم، می‌توانند اجزای مختلف سیستم را در بهترین حالت ممکن کنترل کنند. در ساختمان هوشمند از چهار کنترلر فازی برای کنترل توان تخصیص داده‌شده به بارها استفاده شد. برای بارهای با قابلیت تغییر توان مصرفی، کنترلرها مقدار توان تخصیص داده‌شده به هر بار را با توجه به قیمت انرژی الکتریکی و سیگنال زمان پیشینه مصرف مشخص می‌کنند؛ برای بارهای قابل انتقال در زمان، کنترلر با در نظر گرفتن ورودی‌های مذکور، زمان فعال شدن بار را مشخص می‌کند؛ در MSG نحوه استفاده از منابع به عهده یک کنترلر فازی است به‌طوری‌که این کنترلر اولویت استفاده از منابع را در هر لحظه از زمان تعیین می‌کند؛ همچنین کنترلر فازی دیگری برای مشخص کردن زمان شارژ و دشارژ باتری در نظر گرفته شد. پنج تابع هدف مختلف شامل شرایط مطلوب کاربر داخل ساختمان، هزینه توان مصرفی، انرژی مصرفی در زمان پیشینه مصرف، احتمال عدم کارکرد صحیح MSG و کاهش

مراجع

- [1] Pachauri, S., Ruijven, B.J.V., Nagai, Y. and Riahi, K., "Pathways to Achieve Universal Household Access to Modern Energy by 2030", Environmental Research Letters, Vol. 8, No. 2, pp. 1-7, 2013.
- [2] Gellings, C.W., "The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response", The Fairmont Press, Inc, 2009.
- [3] Mogel, W.A., "Smart Power: Climate Change, the Smart Grid and the Future of Electric Utilities", Energy Law Journal, Vol. 31, No. 1, p. 183, 2010.
- [4] Gharavi, H. and Ghafurian, R., "Smart Grid: The Electric Energy System of the Future", Vol. 99, No. 6, 2011.
- [5] Zareipour, H., Bhattacharya, K. and Canizares, C., "Distributed Generation: Current Status and Challenges", Annual North American Power Symposium. 2004.
- [6] Dussart, M., Lauwers, P., Magnus, S. and Laperches, Y., "Connection Requirements for Dispersed Generation: Evolutions of Existing Requirements and Need for Further Standardization", 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2001.
- [7] Wang, C. and Li, P., "Development and Challenges of Distributed Generation, the Micro-Grid and Smart Distribution System", Automation of electric power systems, 2010.
- [8] Hafez, O. and Bhattacharya, K., "Optimal Planning and Design of a Renewable Energy Based Supply System for Microgrids", Renewable Energy, Vol. 45, pp. 7-15, 2012.
- [9] Osmani, A. and Zhang, J., "Optimal Grid Design and Logistic Planning for Wind and Biomass Based Renewable Electricity Supply Chains Under Uncertainties", Energy, Vol. 70, pp. 514-528, 2014.

- [10] Paris, B. and Eynard, J., "Hybrid PID-Fuzzy Control Scheme for Managing Energy Resources in Buildings", *Applied Soft Computing*, Vol. 11, No. 8, pp 5068-5080, 2011.
- [11] Stimmel, C.L., "Building Smart Cities: Analytics, ICT, and Design Thinking", Auerbach Publications, 2015.
- [12] Tenfen, D. and Finardi, E.C., "A Mixed Integer Linear Programming Model for the Energy Management Problem of Microgrids", *Electric Power Systems Research*, Vol. 122, pp. 19-28, 2015.
- [13] Amini, M. and Frye, J., "Smart Residential Energy Scheduling Utilizing Two Stage Mixed Integer Linear Programming", *North American Power Symposium*, 2015.
- [14] Zhu, Z. and Tang, J., "An Integer Linear Programming Based Optimization for Home Demand-Side Management in Smart Grid", *PES Innovative Smart Grid Technologies*, 2012.
- [15] Oliveira, G.D., Jacomino, M., Ha, D. and Ploix, S., "Optimal Power Control for Smart Homes", *IFAC Proceedings*, Vol. 44, No. 1, pp. 9579-9586, 2011.
- [16] Parisio, A. and Glielmo, L., "A Mixed Integer Linear Formulation for Microgrid Economic Scheduling", *International Conference on Smart Grid Communications*, 2011.
- [17] Kriett, P.O. and Salani, M., "Optimal Control of a Residential Microgrid", *Energy*, Vol. 42, No. 1, pp. 321-330, 2012.
- [18] Huber, M., Sänger, F. and Hamacher, T., "Coordinating Smart Homes in Microgrids: A Quantification of Benefits", *PES ISGT Europe*, 2013.
- [19] Dehnad, A. and Shakouri G. H., "A Novel Model of Intelligent Electrical Load Management by Goal Programming for Smart Houses, Respecting Consumer Preferences", *Energy and Power Engineering*, Vol. 5, No. 10, pp. 622-627, 2013.
- [20] Zhang, D., Shah, N. and Papageorgiou, L.G., "Efficient Energy Consumption and Operation Management in a Smart Building with Microgrid", *Energy Conversion and Management*, Vol. 74, pp. 209-222, 2013.
- [21] Zhang, D., Liu, S. and Papageorgiou, L.G., "Fair Cost Distribution Among Smart Homes with Microgrid", *Energy Conversion and Management*, Vol. 80, pp. 498-508, 2014.
- [22] Zakariazadeh, A., Jadid, S. and Siano, P., "Smart Microgrid Energy and Reserve Scheduling With Demand Response Using Stochastic Optimization", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 63, pp. 523-533, 2014.
- [23] Shakouri G., H. and Kazemi, K., "Multi-Objective Cost-Load Optimization for Demand Side Management of a Residential Area in Smart Grids", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 32, 2018.
- [24] Ganguly, S., Sahoo, N. and Das, D., "Multi-objective Planning of Electrical Distribution Systems Using Dynamic Programming", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 46, pp. 65-78, 2013.
- [25] Xu, Y., Zhang, W. and Liu, W., "Distributed Dynamic Programming-Based Approach for Economic Dispatch in Smart Grids", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 11, No 1, pp. 166-175, 2014.
- [26] Tang, Y., Hea, H., Ni, Z., Wen, J. and Sui, X., "Reactive Power Control of Grid-Connected Wind Farm Based on Adaptive Dynamic Programming", *Neurocomputing*, Vol. 125, pp. 125-133, 2014.
- [27] Nguyen, M.Y., Yoon, Y.T. and Choi, N.H., "Dynamic Programming Formulation of Micro-Grid Operation with Heat and Electricity Constraints", *Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, 2009.
- [28] Mitra, J., Patra, S.B. and Ranade. S.J., "A Dynamic Programming Based Method for Developing Optimal Microgrid Architectures", *15th Power Systems Computational Conf*, 2005.
- [29] Nguyen, T.A. and Crow, M.L., "Optimization in Energy and Power Management for Renewable-Diesel Microgrids Using Dynamic Programming Algorithm", *International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems*, 2012.
- [30] Pooranian, Z. and Nikmehr, N., "Economical and Environmental Operation of Smart Networked Microgrids Under Uncertainties Using NSGA-II", *24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, 2016.
- [31] Motevasel, M., Seifi, A.R. and Niknam, T., "Multi Objective Energy Management of CHP (Combined Heat and Power)-Based Micro-Grid", *Energy*, Vol. 51, pp. 123-136, 2013.
- [32] Yang, R. and Wang, L., "Multi-Objective Optimization for Decision-Making of Energy and Comfort Management in Building Automation and Control", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 2, No 1, pp. 1-7, 2012.
- [33] Buayai, K., Ongsakul, W. and Mithulananthan, N., "Multi-Objective Micro-Grid Planning by NSGA-II in Primary Distribution System", *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 22, No 2, pp. 170-187, 2012.
- [34] Harkouss, F., Fardoun, F. and Biwole, P.H., "Multi-Objective Decision Making Optimization of a Residential Net Zero Energy Building in Cold Climate", *Sensors Smart and Emerging Technologies*, 2017.
- [35] Safaei, A., Freire, F. and Antunes, C.H., "A Life Cycle Multi-Objective Economic and Environmental Assessment of Distributed Generation in Buildings", *Energy conversion and management*, Vol. 97, pp. 420-427, 2015.
- [36] Ma, L., "Multi-Party Energy Management for Smart Building Cluster with PV Systems Using Automatic Demand Response", *Energy and Buildings*, Vol. 121, pp. 11-21, 2016.
- [37] Ferrari, L. and et al., "Development of an Optimization Algorithm for the Energy Management of an Industrial Smart User", *Applied energy*, Vol. 208, pp. 1468-1486, 2017.
- [38] Wang Z, Yang R. and Wang, L., "Intelligent Multi-Agent

- Control for Integrated Building and Micro-Grid System*", PES innovative smart grid technologies, 2011.
- [39] Sedighzadeh, M. and Esmaili, M., "*Stochastic Multi-Objective Economic-Environmental Energy and Reserve Scheduling of Microgrids Considering Battery Energy Storage System*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 106, pp. 1-16, 2019.
- [40] Wolsink, M., "*The Research Agenda on Social Acceptance of Distributed Generation in Smart Grids: Renewable As Common Pool Resources*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 1, pp. 822-835, 2012.