



بهینه‌سازی تامین انرژی شهرهای هوشمند بمنظور مدیریت بحران سوخت با استفاده از الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی

محمد اسکندری^{۱*}، مسعود دارابی^۲، محمدرضا صالحی^۳

۱ استادیار مجتمع دانشگاهی مهندسی و پدافند غیر عامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲ استادیار مجتمع دانشگاهی مهندسی و پدافند غیر عامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳ کارشناسی ارشد رشته مدیریت بحران دانشکده مهندسی و پدافند غیر عامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

سابقه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱

چکیده

افزایش روزافزون جمعیت، مشکلاتی مانند کمبود سوخت‌های فسیلی و افزایش گازهای گلخانه‌ای را به همراه داشته و انسان را به جستجوی راه‌حلی برای حل این مشکلات سوق داده است که یکی از راه‌حل‌ها، تبدیل شهرهای معمولی به شهرهای هوشمند می‌باشد. با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و به‌کارگیری ذخیره‌سازهای ساکن و متحرک مانند خودروهای برقی، می‌توان پایداری این شهرها را بهبود بخشید. هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی تامین انرژی بمنظور مدیریت بحران سوخت در شهرهای هوشمند و کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری است. در این پژوهش بمنظور نیل به این هدف، از الگوریتم‌های فراابتکاری و هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی شهری استفاده می‌شود. این پژوهش، که از نوع توصیفی و تحلیلی است، بمنظور تحلیل کمبود سوخت‌های فسیلی و افزایش گازهای گلخانه‌ای از الگوریتم جغرافیای زیستی استفاده می‌کند. در این الگوریتم، هر منطقه شهری به‌عنوان یک عضو منفرد با شاخص مطلوبیت مخصوص به خود شناخته می‌شود. تحلیل داده‌ها با استفاده از این الگوریتم در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. در این پژوهش، بار تولیدی توسط نیروگاه‌های خورشیدی و بادی محاسبه و از بار کل مورد تقاضا در شبکه کم می‌شود. مقدار باری که باید توسط میکروتوربین، پیل سوختی و باتری‌ها تأمین شود، با استفاده از تابع هدف کاهش هزینه‌ها بهینه‌سازی شده است. بهینه‌سازی برای ۲۴ ساعت و در قالب سه سناریو انجام شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که حضور خودروهای الکتریکی و قابلیت خاموش و روشن شدن منابع تولید پراکنده، به‌طور قابل توجهی هزینه‌های سیستم را کاهش می‌دهد. در سناریوی کامل، بهره‌برداری از شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی هزینه‌های کلی شبکه را کمینه می‌کند. این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب این فناوری‌ها می‌تواند به بهینه‌سازی هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری انرژی در شبکه‌های هوشمند کمک کند.

کلمات کلیدی: خودروهای الکتریکی، شهر هوشمند، تولیدات پراکنده، بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی

۱ مقدمه

امروزه با افزایش جمعیت کره زمین، نیاز به تأمین انرژی نیز به طور چشمگیری افزایش یافته است. بشر همواره در تلاش بوده تا روش‌های نوینی برای دستیابی به انرژی بیابد. این منابع ممکن است شامل منابع تجدیدناپذیر مانند سوخت‌های فسیلی یا منابع تجدیدپذیر انرژی همچون انرژی خورشیدی، باد، امواج دریایی و غیره باشند. در بیشتر کشورها، هزینه مدیریت سوخت‌های فسیلی

¹ Eskandarim@mut.ac.ir

² masuod.darabi@gmail.com

³ Mohamadrezasalehi5205@gmail.com

و هزینه رسیدگی به حوادث خطرناک در این سیستم‌ها، طی ده سال گذشته چندین برابر افزایش یافته است [۱]. از طرفی تحت تأثیر روندهای جهانی مرتبط با تحول انرژی، منابع تامین سوخت فسیلی با توجه به بهره‌برداری از سیستم‌های فیزیکی-سایبری پیچیده باعث شده تا رفتار این منابع پیش‌بینی‌ناپذیر شود [۲،۳] و در عین حال منابع تامین سوخت فسیلی را به یک هدف آسان برای حملات سایبری تبدیل می‌کنند [۴] و [۵]. از سویی دیگر با توجه به آلودگی‌های گسترده در کلان‌شهرها، دولتمردان کشورهای مختلف در جستجوی راه‌حلهایی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند. جایگزینی منابع انرژی تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی، به عنوان یکی از راه‌حل‌های اساسی در نظر گرفته می‌شود. این جایگزینی می‌تواند نگرانی‌های مرتبط با افزایش قیمت انرژی و گرمایش جهانی را کاهش دهد [۷].

یکی از زمینه‌هایی که پژوهشگران در آن فعالیت گسترده‌ای داشته‌اند، جایگزینی سوخت در خودروهای احتراق داخلی است. این خودروها نه تنها سوخت فسیلی مصرف می‌کنند، بلکه با انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی صوتی و دیگر معضلات زیست‌محیطی نیز همراه هستند. از این رو، نیاز به ورود خودروهای برقی به شبکه قدرت به شدت احساس می‌شود. در دهه‌های گذشته، به‌منظور ایجاد فضای رقابتی و ارتقاء کیفیت خدمات، بخشی از تولید و توزیع برق به بخش خصوصی واگذار شد. این تغییر، به دلیل ارائه انرژی ارزان‌تر، دسترسی آسان‌تر، و سازگاری با محیط زیست، تولیدکنندگان را به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ترغیب کرد. نتیجه این روند، ظهور مفاهیمی چون تولیدات پراکنده و ریزشبکه‌ها بود. تولید پراکنده به منابع کوچک تولید انرژی با توان کمتر از ۵۰ مگاوات اطلاق می‌شود که قابلیت نصب و بهره‌برداری آسان در سطح ولتاژ توزیع را دارند [۸].

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که تا سی سال آینده، دو سوم جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی خواهند کرد. این بدان معناست که تا سال ۲۰۵۰، جمعیتی بالغ بر ۶ میلیارد نفر در شهرها ساکن خواهند شد [۹]. بنابراین روند شهری شدن زود هنگام جهان واقعیتی گریزناپذیر است. قرن ۲۱ قرن شهرها است، از این رو شهرها نقش محوری در اقتصاد دارند و نیروی محرکه در رقابت جهانی، اطلاعات، توسعه و نوآوری و در حال تبدیل شدن به قطب‌های یکپارچه در سطح جهانی و جوامع مبتنی بر خدمات با نفوذ و مسئولیت بیشتر و همچنین مکانی برای تمرکز سرمایه‌های فیزیکی و انسانی هستند، به گونه‌ای که ۸۰ درصد تولید ناخالص جهانی مربوط به شهرهاست و پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۵۰، ۶۰۰ شهر از بزرگترین شهرهای جهان ۶۰ درصد از تولید ناخالص داخلی جهان را تولید کنند [۱۰]. در حالی که امروزه تنها ۵۴ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند. برای تأمین نیازهای این جمعیت عظیم، اهدافی مانند کاهش انتشار CO₂، افزایش بهره‌وری انرژی، استفاده بهینه از انرژی‌های تجدیدپذیر، و ایجاد فرصت‌های شغلی باید محقق شوند. یکی از راهکارهای کلیدی در این راستا، تبدیل شهرها به شهرهای هوشمند است. با این حال، ساختار فعلی شبکه‌های برق برای اتصال تولیدات پراکنده و ورود خودروهای برقی طراحی نشده است. این موضوع، توجه ویژه پژوهشگران را به خود جلب کرده، چرا که در صورت مدیریت نادرست، شبکه با چالش‌های جدی مواجه خواهد شد. در این پژوهش، تلاش شده تا سیستمی طراحی شود که امکان ورود خودروهای برقی به شبکه قدرت، با در نظر گرفتن زیرساخت‌های موجود، فراهم شود. همچنین، از تولیدات پراکنده نظیر انرژی توربین‌های بادی و انرژی خورشیدی به صورت بهینه استفاده شود. این رویکرد می‌تواند گامی مؤثر در جهت توسعه پایدار و تحول شهرها به شهرهای هوشمند باشد.

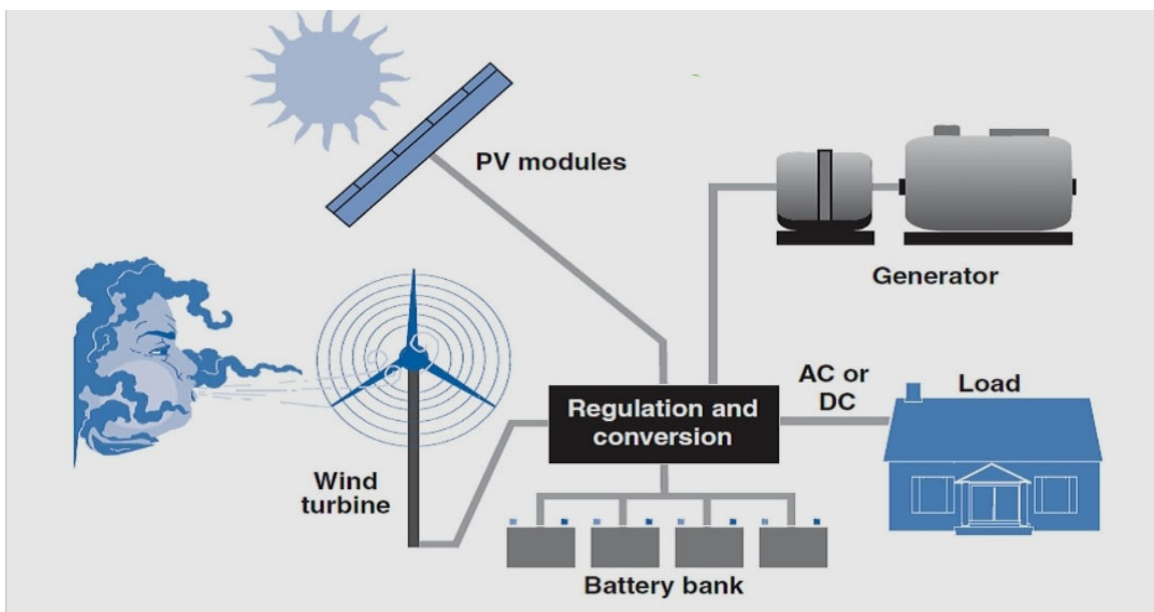
۲ پیشینه تحقیق

شهرنشینی شتابان و تلاش برای کاهش مشکلات ناشی از رشد جمعیت شهری یکی از عوامل اصلی پیدایش و مطرح شدن شهر هوشمند است [۱۱]. شهر هوشمند را می‌توان شهری تعریف کرد که با بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های انرژی و استفاده از فناوری‌های پیشرفته، چالش‌هایی همچون تأمین انرژی، مدیریت جمعیت و کنترل ترافیک را حل کند. در این شهرها، ارتباط متقابل سیستم‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد و باید مانند یک شبکه هوشمند عمل کنند. این امر زمانی محقق می‌شود که فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات نقش کلیدی خود را ایفا کنند [۱۲]. شبکه هوشمند نیز راه‌حلی مناسب برای چالش‌هایی نظیر ورود تولیدات

پراکنده به شبکه قدرت است، که موجب دگرگونی ساختار این شبکه می‌شود. تجدید ساختار شبکه برق و توجه به مسائل اقتصادی، شبکه هوشمند را هم در تولید و هم در مصرف به عنصر حیاتی تبدیل کرده است [۱۳]. از فواید شبکه هوشمند می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- فراهم‌سازی امکان ذخیره انرژی تجدیدپذیر و مدیریت برخط مصرف انرژی توسط کاربران، به‌ویژه در ساعات اوج مصرف.
- ارائه اطلاعات جامع و دقیق از وضعیت شبکه به بهره‌برداران.

انگیزه اصلی برای حرکت شهرها به سمت هوشمندی در تمایل آنها برای توسعه اقتصادی نهفته بود. در خلال بحران‌های اقتصادی سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ شهرها متوجه شدند که آنها با شهرهای دیگر در رقابت هستند، اما به روش‌هایی که قبل از آن تجربه نکرده‌اند. آنها تنها با همسایگان خود در ایالت و یا در سطح ملی در رقابت نبودند، بلکه در اثر شبکه‌های عرضه و تقاضای جهانی و اینترنت با دیگر هم‌تایان خود در آن سوی جهان برای نسل‌های مختلف (حاضر و آتی) در رقابت بودند [۱۴]. استفاده از خودروهای الکتریکی و منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان راه‌حلی برای صرفه‌جویی در انرژی و کاهش گازهای گلخانه‌ای مطرح شده است [۱۵]. کشورهایی مانند کره جنوبی، امارات و چین از پیشگامان سرمایه‌گذاری در شهرهای هوشمند هستند و این مفهوم به سایر کشورها، از جمله آمریکای شمالی و اروپای غربی، نیز گسترش یافته است [۱۶]. طبق پژوهش‌ها، شهر هوشمند به پنج بخش اصلی تولید، ذخیره‌سازی، زیرساخت، امکانات و حمل‌ونقل تقسیم می‌شود. این شهرها از انرژی‌های تجدیدپذیر برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و از انرژی‌های تجدیدناپذیر مانند تولید همزمان حرارت و توان (CHP) برای برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت استفاده می‌کنند [۱۷]. هدف از ایجاد شهرهای هوشمند، استفاده بیشینه از منابع تجدیدپذیر و تولیدات پراکنده (DG) برای افزایش بهره‌وری و قابلیت اطمینان شبکه است [۱۸، ۱۹].



شکل ۱. نمایی از تولیدات پراکنده

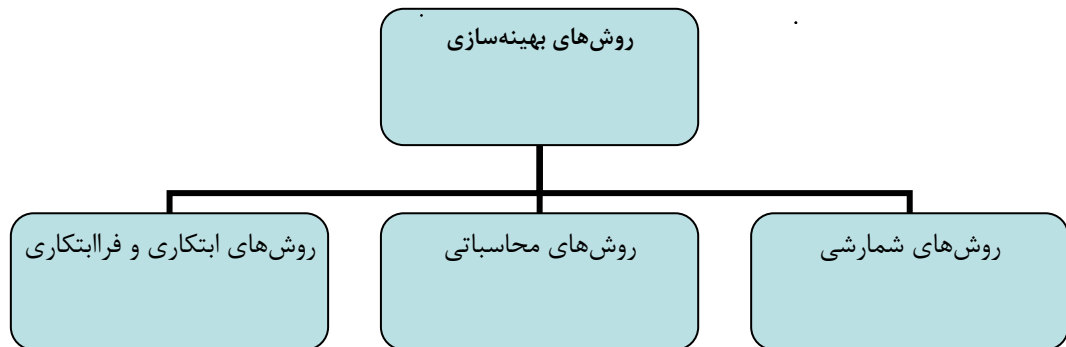
۳ مبانی نظری

۱-۳ الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی

«بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی»^۱ یکی از الگوریتم‌های به‌نسبت جدید در حوزه بهینه‌سازی هوشمند است که دن سایمون در سال ۲۰۰۸ معرفی کرد. این الگوریتم از چگونگی انتشار گونه‌های جانداران در زیستگاه‌های متعدد الهام گرفته است. جانداران تلاش می‌کنند منابع را به صورت انحصاری در اختیار خود بگیرند، به صورتی که قوی‌ترها در این مبارزه موفق خواهند شد؛ این گرایش به انحصار به آن دلیل است که جانوران تاکید به رفتن به جاهای خلوت دارند؛ می‌توان نتیجه گرفت که سکونتگاهی برای جانوران بهتر است که جمعیت کمتری داشته باشد.

هر منطقه در این الگوریتم دارای «شاخص مطلوبیت زیستی»^۲ مخصوص به خود است. زیستگاهی که دارای شاخص مطلوبیت ذاتی مثلی^۳ بیشتری است، محل مناسبی برای ساکن شدن گونه‌های جانوری است. در مسائل بهینه‌سازی، تابع هدف همان شاخص مطلوبیت زیستی است و متغیر تصمیم‌گیری شاخص شایستگی نیز «مقدار اهمیت گونه‌ها»^۴ است.

ویژگیهایی که تعیین‌کننده شاخص مطلوبیت زیستی هستند معمولاً عبارتند از: بارندگی، تنوع گیاهی، خاک منطقه و دما که این ویژگیها متغیر تصمیم‌گیری مقدار اهمیت گونه‌ها هستند. در زیستگاهی با شاخص مطلوبیت زیستی بالا گونه‌های زیادی از جانداران زندگی می‌کنند که سعی در مهاجرت به منطقه‌های دیگر دارند. این مفهوم را نیز می‌توان دریافت کرد که در زیستگاهی با شاخص مطلوبیت زیستی بالا نرخ مهاجرت به خارج از زیستگاه بالا است، اما نرخ مهاجرت به داخل کم است زیرا قبلاً توسط گونه‌ها پر شده و نمی‌تواند پذیرای گونه جدیدی باشد. در زیستگاهی که دارای شاخص مطلوبیت زیستی کمتری است، به دلیل خلوت بودن زیستگاه، نرخ مهاجرت به داخل زیاد است و به نوعی این منطقه مهاجرت‌پذیری بالایی دارد. در الگوریتم ژنتیک همانطور که گفته شد، عملگرهایی مانند جهش مطرح می‌شود. در این الگوریتم، عملگرهای مهاجرت و جهش باعث ایجاد تغییر در تولید جمعیت نسل‌ها می‌شود [۲۰] و به تکامل بهتر راه‌حل‌ها کمک می‌کنند [۲۱]. انواع روش‌های بهینه‌سازی مطابق شکل ۲ می‌باشد.



شکل ۲. روش‌های بهینه‌سازی

۲-۳ سلول‌های فوتوولتائیک (PV)

در این سلول‌ها از مواد نیمه‌هادی استفاده شده تا انرژی خورشید به انرژی الکتریکی تبدیل شود. این فناوری منبع قابل اعتمادی برای گرم کردن آب یا مایعات و انتقال گرما محسوب می‌شود (اوسائولا، ۲۰۱۷). بهره‌گیری از این فناوری بسیار مقرون‌به‌صرفه است و در نیروگاه‌های خورشیدی برای تولید برق کاربرد دارد. نمونه‌ای از پژوهش‌های مرتبط با این سلول‌ها و عملکرد آنها در ادامه ارائه شده است [۲۲].

¹ Biogeography- Based Optimization (BBO)

² Habitat Suitability Index (HIS)

³ Habitat Suitability Triangle

⁴ Species Importance Value (SIV)

کورنالکیز^۱ و همکاران یک سیستم فوتولتائیک را با اهداف اقتصادی مورد بررسی قرار داده و تلاش کرده‌اند طراحی این سیستم را به صورت بهینه انجام دهند. در این پژوهش، آنها به دنبال تعیین مقدار بهینه پیمان‌های سلول‌های خورشیدی، بهترین تعداد و نوع تجهیزات بوده‌اند. متغیرهای کنترلی بر اساس اقتصادی‌ترین حالت ممکن و با در نظر گرفتن طول عمر متغیرها انتخاب شده‌اند. در یک سیستم خورشیدی، برای انتخاب بهترین ساختار می‌توان بر اساس ارزش‌های زیر عمل کرد [۲۳]

- ارزش اجزای ساختار سیستم در زمان فعلی.
- مدت‌زمان بازگشت هزینه سرمایه‌گذاری.
- روش‌هایی برای بهینه‌سازی بهره‌وری [۲۴]

۳-۳ روش‌های ذخیره‌سازی در شهرهای هوشمند

سیستم‌های ذخیره‌سازی را بر حسب زمان تخلیه می‌توان به سه دسته تقسیم کرد [۲۵]

۱. ذخیره‌سازی‌های انبوه: این سیستم‌ها معمولاً بین ۱ تا ۸ ساعت عمل می‌کنند و غالباً برای رزرو چرخان استفاده می‌شوند.
۲. ذخیره‌سازی تولید پراکنده: این سیستم‌ها بین ۳۰ دقیقه تا ۴ ساعت فعالیت می‌کنند و معمولاً برای اصلاح اوج مصرف و همگام‌سازی منابع تجدیدپذیر به کار می‌روند.
۳. ذخیره‌سازی کیفیت توان: این سیستم‌ها در بازه زمانی بسیار کوتاه (در حد ثانیه) برای افزایش قابلیت اطمینان توان مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در صورت فراهم بودن زیرساخت مناسب در شهرهای هوشمند، می‌توان از ویژگی‌هایی مانند قابلیت «خودرو به شبکه»^۲ و «شبکه به خودرو»^۳ بهره برد که تأثیر چشمگیری در کاهش هزینه‌های شبکه دارند. همان‌طور که در مبحث ذخیره‌سازی اشاره شد، باتری خودروهای الکتریکی را می‌توان به عنوان ذخیره‌سازی در شهرهای هوشمند به کار برد، مشروط بر وجود زیرساخت مناسب.

- در زمان‌هایی که هزینه برق یا تقاضا در شبکه کم است، خودروهای برقی را می‌توان شارژ کرد.
- در زمان‌هایی که تقاضا در شبکه زیاد است و شبکه به تنهایی قادر به پاسخ‌گویی نیست، خودروهای الکتریکی با دشارژ باتری‌های خود به کمک شبکه می‌آیند یا در ساعات اوج مصرف، با هزینه کمتر، برق ذخیره‌شده در باتری‌های خود را در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌دهند.

بخشی از مطالعات به بررسی این مورد پرداخته‌اند که در ادامه به آنها اشاره می‌شود: ماداولا^۴ و همکارانش به مطالعات مربوط به حضور خودروهای برقی در یک شبکه برق محلی پرداختند که در این شبکه برق یک منبع تولید توان خورشیدی نیز وجود دارد [۲۶]. این پژوهش با این فرض انجام شد که با دشارژ خودروها، انتقال انرژی به شبکه صورت پذیرد و این شبکه از قابلیت «خودرو به شبکه» بهره‌مند است. همچنین در نقطه مقابل، شبکه نیز به راحتی امکان تامین توان خودروهای برقی قابلیت «شبکه به خودرو» را داراست. اما این پژوهش مطابق با الگوی بار خاصی پیش رفته است و قابلیت تعمیم را ندارد [۲۷]. مهمترین بخش که باید در این زمینه بررسی شود، زیرساخت برای همبستگی منابع تولید پراکنده است [۲۸]. همچنین مطالعاتی در قسمت ادغام منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی نیز صورت گرفته است. حضور خودروهای الکتریکی در سیستم شهری باعث می‌شود که قیمت برق کاهش یابد [۲۹]. درود و دستیارانش (۲۰۲۲) شروع به پژوهشی در برزیل کردند که هدفش پیکسایی در یک شبکه

¹ Kornlakays

² Vehicle-to-Grid (V2G)

³ Grid-to-Vehicle (G2V)

⁴ Madola

برق است که دارای منابع تولید توان پراکنده و خودروهای برقی بودند. بر اساس نتایجی که این پژوهش به دنبال داشت وجود خودروهای برقی تا زمانی که تعدادشان خیلی زیاد نشود به بهینه‌سازی و همین‌طور پایداری شبکه کمک می‌کند. اما اگر تعدادشان از حد معینی فراتر برود، باعث ناپایداری شبکه برق خواهد شد. در بیشتر مقالات برای بررسی باتریهای خودروهای الکتریکی از میزان شارژ^۱ کمک گرفته می‌شود در حالی که در این مقاله از عمق دشارژ^۲ بهره گرفته شده است [۳۰].

جی ونگ^۳ با هدف کمینه کردن کل هزینه‌ها، یک شبکه را بهینه‌سازی می‌کند و نتایج به دست آمده را روی شبکه ۳۳ با سه به نمایش می‌گذارد (والترز، ۲۰۲۱). در این بهینه‌سازی سعی شده که بارهای کنترل‌پذیر از جمله منابع تولید پراکنده، خودروهای الکتریکی و باتریها که ذخیره‌سازی را بر عهده دارند مورد بررسی قرار گیرد. ایراد این بهینه‌سازی آن است که خودروهای الکتریکی را فقط به عنوان بار در نظر گرفته‌اند و از حرکت خودروهای برقی، مسیر حرکت آنها و زمان حرکت صرف نظر شده است [۳۱].

در این پژوهش، از باتری خودروهای برقی به عنوان ذخیره‌ساز بهره گرفته شده است. این باتری‌ها در ساعاتی از شبانه‌روز که قیمت برق ارزان‌تر است، شارژ می‌شوند و در زمان‌هایی که برق شبکه گران می‌شود، انرژی ذخیره‌شده خود را به شبکه می‌فروشند. این روش باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. از آنجا که توان خروجی توربین‌های بادی و انرژی خورشیدی دارای نوسانات بالاست و قابل کنترل نیست، در زمان‌هایی که شبکه به انرژی نیاز دارد، از انرژی ذخیره‌شده در باتری خودروهای برقی استفاده می‌شود تا این نوسانات به میزان قابل قبولی کنترل شوند.

۴ روش تحقیق

پژوهش حاضر از گروه پژوهش‌های کاربردی و از نوع پژوهش‌های توصیفی-تحلیلی است که به بررسی و شناخت مدل مناسب برای بهبودسازی کیفیت شهرهای هوشمند با استفاده از بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی می‌پردازد. به صورت خلاصه مراحل انجام الگوریتم «بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی» را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- تعریف مسئله و تعیین تابع هدف: تعریف مسئله به گونه‌ای که تابع هدف آن متناسب با بهینه‌سازی کیفیت شهر هوشمند باشد. این تابع هدف می‌تواند شامل کاهش هزینه‌های انرژی، بهینه‌سازی زیرساخت‌ها، یا افزایش کارایی منابع باشد.
- ایجاد جمعیت اولیه: زیستگاه‌های اولیه به صورت تصادفی ایجاد می‌شوند. هر زیستگاه نشان‌دهنده یک راه‌حل بالقوه برای مسئله است و مقدار شاخص مطلوبیت زیستی برای هر زیستگاه محاسبه می‌شود.
- محاسبه نرخ مهاجرت: زیستگاه‌ها با شاخص مطلوبیت زیستی بالا دارای نرخ مهاجرت به بیرون بالا و نرخ مهاجرت به داخل پایین هستند، در حالی که زیستگاه‌های با شاخص مطلوبیت زیستی پایین مهاجرت‌پذیرتر بوده و گونه‌های بیشتری را از زیستگاه‌های با شاخص مطلوبیت زیستی بالا دریافت می‌کنند.
- انجام عملگر مهاجرت: در این مرحله، تبادل اطلاعات بین زیستگاه‌ها از طریق مهاجرت انجام می‌شود. این تبادل منجر به اصلاح زیستگاه‌های با شاخص مطلوبیت زیستی پایین و نزدیک‌تر شدن آنها به زیستگاه‌های با شاخص مطلوبیت زیستی بالا می‌شود.
- اعمال عملگر جهش: با هدف جلوگیری از گیر افتادن در بهینه‌های محلی و ایجاد تنوع در جمعیت، احتمال جهش برای برخی زیستگاه‌ها در نظر گرفته می‌شود. این عملگر موجب تغییرات ناگهانی در زیستگاه‌ها شده و فرصت کشف راه‌حل‌های جدید را فراهم می‌کند.

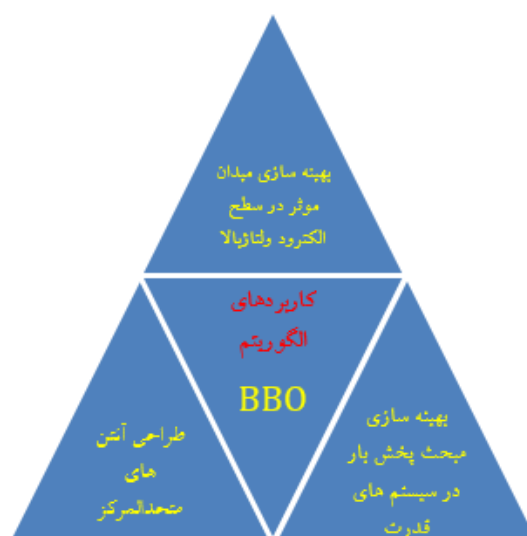
¹ State of Charge (SOC)

² Depth of Discharge (DOD)

³ Jiweng

- روزرسانی شاخص مطلوبیت زیستی: پس از اعمال عملگرهای مهاجرت و جهش، شاخص مطلوبیت زیستی برای زیستگاه‌های جدید محاسبه و جمعیت به‌روزرسانی می‌شود.
- بررسی شرط توقف: اگر شرط توقف (مانند تعداد تکرارها یا رسیدن به مقدار مشخصی از شاخص مطلوبیت زیستی) تحقق یابد، الگوریتم خاتمه می‌یابد. در غیر این صورت، مراحل از نو تکرار می‌شوند.
- ارائه راه‌حل بهینه: زیستگاهی که بالاترین مقدار شاخص مطلوبیت زیستی را دارد به عنوان بهترین راه‌حل بهینه‌سازی ارائه می‌شود.

این مراحل به طور مداوم و با هدف دستیابی به بهینه‌سازی کیفیت شهرهای هوشمند تکرار می‌شوند تا مدلی کارآمد و عملیاتی برای افزایش کارایی و بهبود کیفیت زندگی در این شهرها ارائه شود.



شکل ۳. کاربردهای الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی

در این روش بهینه‌سازی، سه مورد اصلاحیه وجود دارد که در ادامه به آن می‌پردازیم. اصلاحیه‌ها باعث بهتر شدن روند به روزرسانی جمعیت می‌شوند؛ اگر از این اصلاحیه‌ها استفاده شود، مشکلاتی از جمله همگرایی زودرس و همگرایی به نقاط بهینه محلی اتفاق نخواهد افتاد. تاکید این اصلاحیه بر انتخاب تطبیق است. این اصلاحیه به همگرا شدن الگوریتم به نقاط محلی کمک می‌کند و به این شکل اجرا می‌شود:

$$AN - iterx \left(N_{min} + \frac{N * N_{min}}{iter_{mx}} \right)$$

در این معادله دیده می‌شود که

- AN: میزان تغییر در جمعیت
- N: مقدار جمعیت بیشینه الگوریتم
- N_{min} : مقدار کمینه جمعیت
- Iterx: تعداد تکرار فعلی یا یک ضریب وزنی
- iter mx: مقدار بیشینه تناوب الگوریتم

شبیه‌سازی انجام شده در پژوهش به همراه دو توربین بادی، دو سلول خورشیدی، یک پیل سوختی، یک میکروتوربین و باتریهای خودروهای الکتریکی انجام شده است. برای به دست آوردن درک و دید بهتر، این مسئله به سه صورت شبیه‌سازی شده است. در آخر به راحتی می‌توان بین این سه شبیه‌سازی صورت گرفته مقایسه کرد و به جواب مطلوبی رسید.

(۱) شبکه فاقد خودرو الکتریکی باشد، به این معنا که ورود و خروج خودروها به شبکه اتفاق نمی‌افتد؛ البته در شبکه باتری‌ها همچنان به عنوان ذخیره‌ساز به فعالیت خود می‌دهند؛ به علاوه منابع نیز قابلیت خاموش و روشن شدن را ندارند. همه منابع در ادامه روشن در نظر گرفته شده است.

(۲) در مورد دوم همچنان خودروها در شبکه حضور نداشته باشند، اما منابع قابلیت خاموش و روشن شدن را داشته باشند.

(۳) در مورد آخر شبیه‌سازی زمانی اتفاق می‌افتد که هم خودروها در شبکه حضور داشته باشند و فعالیت کنند و هم منابع قابلیت خاموش و روشن شدن را داشته باشند.

۵ یافته‌های تحقیق

شهر هوشمندی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته، همان‌طور که اشاره شد، از دو توربین بادی و دو سلول خورشیدی بهره می‌برد. این دو منبع در دسته منابع تولید پراکنده قرار دارند. علاوه بر این، از یک پیل سوختی، یک میکروتوربین و باتری خودروهای الکتریکی نیز در این سیستم استفاده شده است. در بخش‌های قبل اجزای مختلف شهرهای هوشمند شامل تولید، ذخیره‌سازی، زیرساخت‌ها، امکانات و حمل‌ونقل معرفی شدند. مدل ریاضی مرتبط با این اجزا ارائه شد و تابع هدف، که کمینه‌سازی هزینه‌های کل سیستم است، تعریف شد.

در ادامه به شبیه‌سازی این سیستم پرداخته می‌شود. ابتدا اطلاعات ورودی مربوط به این بهینه‌سازی بررسی می‌شود. شهر هوشمند مورد مطالعه دارای منابع تولید پراکنده است و مشخصات این منابع در این بخش مورد تحلیل قرار می‌گیرند. داده‌های مرتبط با کمینه و بیشینه ظرفیت منابع تولید پراکنده، هزینه‌های برق، و هزینه‌های خاموش و روشن شدن این منابع در یک جدول ارائه می‌شوند. اگرچه سلول‌های خورشیدی و واحدهای توربین‌های بادی هیچ سوختی مصرف نمی‌کنند، اما هزینه آنها نسبت به سایر واحدها بالاتر است. این تفاوت به دلایل زیر است:

- هزینه اولیه سرمایه‌گذاری بالا: این واحدها به دلیل فناوری پیشرفته و پیچیده‌ای که دارند، نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی هستند.
- بازگشت سریع سرمایه: قیمت توان تولیدی این واحدها به دلیل امکان بازگشت سریع‌تر سرمایه‌گذاری، نسبت به واحدهای سنتی بالاتر تعیین می‌شود.
- تشویق سرمایه‌گذاری در منابع تجدیدپذیر: قیمت بالاتر این توان‌ها، سیاستی برای ترغیب افراد و شرکت‌ها به سرمایه‌گذاری در انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر است.

سیستم مورد بررسی شامل منابع تولید پراکنده‌ای مانند:

- دو سلول خورشیدی
- دو توربین بادی یکسان
- یک پیل سوختی

- یک میکروتوربین
- باتری‌های خودروهای الکتریکی

به‌علاوه، یک خط تبادل توان میان سیستم و شبکه بالادست وجود دارد. هر یک از واحدهای این سیستم قابلیت تبادل انرژی الکتریکی با شبکه بالادست را دارند. سیستم کنترل ریزشبه می‌تواند بسته به نیاز، توان الکتریکی را از شبکه بالادست خریداری کرده یا به آن بفروشد. در جدول شماره ۱، ضرایب انتشار آلاینده‌ها برای منابع تولید پراکنده مورد استفاده در سیستم ارائه شده است. این ضرایب نشان‌دهنده میزان تأثیر هر منبع تولیدی بر آلودگی محیط‌زیست بوده و در تصمیم‌گیری‌های بهینه‌سازی نقش کلیدی ایفا می‌کنند.

جدول ۱. ضرایب انتشار آلاینده‌ها

نوع منبع	حداقل توان	حداکثر توان	قیمت	هزینه روشن و خاموشی
میکروتوربین	2/99	5/595	457/0	96/0
پیل سوختی	6/49	496	294/0	65/1
نیروگاه خورشیدی	0	392	584/2	-
توربین بادی	0	172	073/1	-
باتری	496	496-	38/0	-
شبکه بالادست	496	496-	-	-

۱-۵ فرضیات مربوط به خودروهای الکتریکی

برای مدل‌سازی دقیق خودروهای الکتریکی، اطلاعات اولیه و فرضیات ذیل در نظر گرفته می‌شود که در شبیه‌سازی لحاظ می‌شوند. این فرضیات شامل زمان و مکان حرکت، پایان سفر خودروها و همچنین ویژگی‌های مرتبط با مصرف انرژی و باتری آنها است.

۱. الگوی جابجایی خودروها:

- هر خودروی الکتریکی در روز دو جابجایی اصلی انجام می‌دهد.
 - جابجایی اول: از منزل به محل کار در ابتدای روز.
 - جابجایی دوم: از محل کار به منزل در پایان روز.
- طبق مطالعات انجام‌شده در آمریکا (۲۰۰۹)، خودروها در طول جابجایی‌ها به طور متوسط سه توقف کوتاه به مدت ۱۰ دقیقه دارند.

۲. مصرف انرژی و سطح شارژ:

- فرض بر این است که انرژی مصرفی خودروها برای رفت و برگشت یکسان است.
 - سطح انرژی اولیه خودروها در ابتدای روز 100% در نظر گرفته می‌شود.
۳. استفاده از ویژگی «خودرو به شبکه»
- هرگاه خودرو به مکانی برسد که امکان اتصال به شبکه قدرت وجود داشته باشد، می‌تواند از ویژگی «خودرو به شبکه» (تغذیه شبکه از باتری خودرو) استفاده کند.

- اگر باتری خودرو دشارژ شود و انرژی به شبکه تزریق کند، باید کمینه انرژی لازم برای بازگشت به منزل در باتری باقی بماند.
 - سطح انرژی باتری در زمان رسیدن خودرو به منزل نباید به زیر ۵۰٪ برسد.
 - این شرط به منظور جلوگیری از دشارژ کامل باتری‌ها است که باعث کاهش شدید عمر باتری می‌شود.
۴. زمان‌های اتصال و قطع از شبکه:

- خودروهای الکتریکی در طول روز گاهی به شبکه متصل بوده و تبادل انرژی انجام می‌دهند و در سایر زمان‌ها از شبکه جدا هستند.
 - زمان‌های اتصال و قطع این خودروها به شبکه در جدول ۲ مشخص شده است.
- مشخصات باتری و انرژی عبارتست از:

- کمینه و بیشینه ظرفیت باتری‌ها (kWh)
- مقدار متوسط انرژی مصرفی خودروها در هر جابجایی (kWh)
- سطح شارژ اولیه (SOC) و شرایط لازم برای دشارژ و شارژ باتری.

تأثیر فرضیات در شبیه‌سازی بصورت ذیل می‌باشد:

- این مدل به کمک داده‌های مصرف انرژی و زمان‌بندی جابجایی خودروها، الگوی تعامل خودروهای الکتریکی با شبکه قدرت را بررسی می‌کند.
- شرایط «خودرو به شبکه» کمک می‌کند تا خودروها در ساعات اوج مصرف، توان خود را به شبکه تزریق کنند و در ساعات کم مصرف باتری‌ها را شارژ نمایند.
- این شبیه‌سازی تأثیرات اقتصادی و فنی استفاده از خودروهای الکتریکی بر پایداری شبکه و بهینه‌سازی هزینه‌ها را ارزیابی می‌کند.

جدول ۲. وضعیت اتصال خودرو به شبکه

نوع آلاینده	شبکه بالادست	باتری	نیروگاه بادی	نیروگاه خورشیدی	پیل سوختی	میکروتوربین
CO2	$921 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	0	0	$460 \cdot 10^{-3}$	$720 \cdot 10^{-3}$
SO2	$3.58 \cdot 10^{-3}$	$0.0002 \cdot 10^{-3}$	0	0	$0.003 \cdot 10^{-3}$	$0.0036 \cdot 10^{-3}$
NOX	$2.29 \cdot 10^{-3}$	$0.001 \cdot 10^{-3}$	0	0	$0.007 \cdot 10^{-3}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$

جدول ۳. محدودیت‌های باتری خودرو

خودروهای الکتریکی	ساعت جدا شدن از شبکه قدرت	ساعت متصل شده به شبکه
۱	۶ ساعت	۷ ساعت
۲	۱۶ ساعت	۱۷ ساعت

۲-۵ نتایج بررسی سناریوها

۱- سناریوی اول: بهره‌برداری ثابت و بدون خاموشی منابع: ویژگی‌های این سناریو به شرح ذیل می‌باشد.

- همه واحدهای تولیدی در تمام ساعات شبانه‌روز روشن هستند.
 - بهره‌بردار موظف است کمینه توان تولیدی تمام واحدها را خریداری کند.
 - میکروتوربین: به دلیل هزینه بالای تولید، در کمینه ظرفیت مجاز فعالیت می‌کند.
 - کارایی اقتصادی: به دلیل روشن بودن دائمی تمام منابع، هزینه بهره‌برداری در این سناریو بالاست.
- از اینرو می‌توان نتیجه گرفت که این سناریو اگرچه تأمین برق پایدار را تضمین می‌کند، اما فاقد انعطاف‌پذیری اقتصادی است و هزینه کل سیستم بهینه نیست. نتایج شبیه‌سازی این سناریو در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. نتایج سناریوی اول

نوع	حداقل ظرفیت	حداکثر ظرفیت	شارژ اولیه	نرخ حداکثر مقدار شارژ و دشارژ
خودرو الکتریکی	۲۶۳	۱۹۷۳	۱۹۷۳	۴۹۶

۲- سناریوی دوم: بهره‌برداری انعطاف‌پذیر با خاموشی منابع: ویژگی‌های این سناریو به شرح ذیل می‌باشد.

- بهره‌بردار سیستم توانایی روشن و خاموش کردن منابع بر اساس هزینه و تقاضا را دارد.
- میکروتوربین: در بسیاری از ساعات روز به دلیل هزینه بالا خاموش است و تنها در مواقع ضروری فعال می‌شود.
- کارایی اقتصادی: کاهش هزینه‌ها نسبت به سناریوی اول، زیرا منابع غیرضروری در ساعات کم‌بار مصرف خاموش می‌شوند.
- نقاط قوت: بهره‌برداری اقتصادی‌تر و کاهش هزینه تولید برق.

از این رو می‌توان نتیجه گرفت که این سناریو انعطاف‌پذیری بیشتری را به سیستم اضافه کرده و به دلیل امکان خاموشی منابع پرهزینه، هزینه‌ها بهینه‌تر شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی این سناریو در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. نتایج سناریوی دوم

نتایج شبیه‌سازی با الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی	بهینه‌ترین جواب	بدترین جواب	میانگین کل جواب‌ها
	۱۶۶۰۵	۱۶۶۵۶	۱۶۶۳۳

۳- سناریوی سوم: بهره‌برداری کامل با استفاده از ذخیره‌سازها و خودروهای برقی: ویژگی‌های این سناریو به شرح ذیل می‌باشد.

- ویژگی‌ها:

- اضافه شدن خودروهای برقی و باتری‌ها به عنوان منابع ذخیره‌سازی قابل تعامل با شبکه.
- عملکرد باتری‌ها: در ساعات کم‌بار با قیمت پایین از شبکه توان می‌خرند و ذخیره می‌کنند و در ساعات اوج مصرف با قیمت بالاتر توان را به شبکه می‌فروشند.
- خودروهای برقی از قابلیت‌های «خودرو به شبکه» (تخلیه توان به شبکه) و «شبکه به خودرو» (شارژ از شبکه) بهره می‌برند.

○ چالش‌های اصلی این سناریو عبارتند از:

- پیچیدگی بالاتر در مدیریت به دلیل اضافه شدن باتری‌ها و تعاملات خودروهای برقی.
- نیاز به استراتژی‌های پیشرفته‌تر برای مدیریت شارژ و دشارژ.

○ مزایای این سناریو عبارتند از:

- کمینه هزینه کل سیستم: این سناریو به دلیل استفاده بهینه از ذخیره‌سازها و خودروهای برقی، کمترین هزینه بهره‌برداری را در میان سه سناریو به همراه دارد.
- پایداری و قابلیت اطمینان بیشتر: ذخیره‌سازی انرژی در باتری‌ها و توانایی خودروهای برقی برای تأمین بارهای پیک، به انعطاف‌پذیری و پایداری سیستم کمک می‌کند.
- بهره‌وری اقتصادی: فروش توان ذخیره شده در ساعات اوج مصرف، درآمدزایی و کاهش هزینه‌ها را تضمین می‌کند.

از این رو می‌توان نتیجه گرفت که این سناریو، بهترین و اقتصادی‌ترین حالت بهره‌برداری است و پتانسیل بالایی برای بهبود عملکرد ریزش‌بکه دارد. نتایج شبیه‌سازی این سناریو در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶. نتایج سناریوی سوم

میانگین کل جواب‌ها	بدترین جواب	بهینه ترین جواب	نتایج شبیه سازی با الگوریتم الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی
۱۶۴۵۲	۱۶۴۹۴	۱۶۴۱۱	

مقایسه کلی سه سناریو به شرح جدول ۷ می‌باشد. سناریوی سوم، با استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی و خودروهای برقی، بهترین گزینه برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش پایداری سیستم است. این رویکرد، با پیچیدگی مدیریتی بالاتر، مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی به همراه دارد و برای شهرهای هوشمند مدرن، مناسب‌ترین راهکار به شمار می‌آید. نتایج موجود در جداول مختلف، حاصل اجرای مدل بهینه‌سازی در محیط متلب بوده و مقادیر هزینه‌ها و عملکرد سیستم در هر سناریو بر اساس شبیه‌سازی‌های عددی به‌دست آمده‌اند. همچنین، جهت اعتبارسنجی نتایج، نظرات خبرگان جمع‌آوری و در تحلیل نهایی لحاظ شده است.

جدول ۷. مقایسه کلی سناریوها

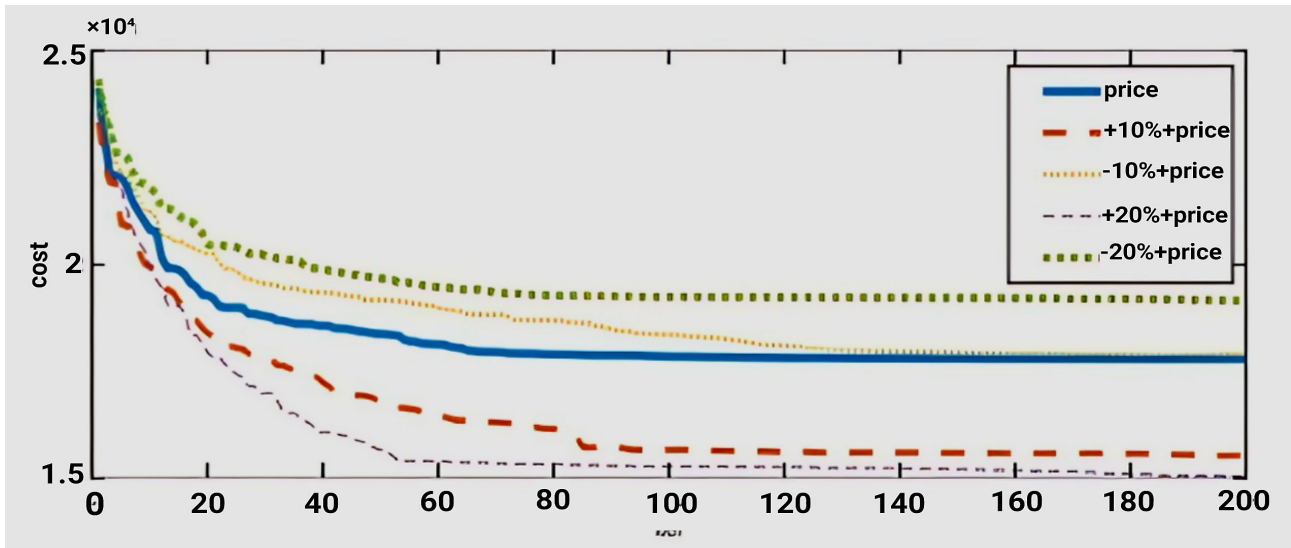
ویژگی‌ها	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم (کامل)
انعطاف‌پذیری بهره‌برداری	پایین	متوسط	بالا
هزینه بهره‌برداری	بالا	کمتر	کمترین
تعامل با شبکه	محدود	محدود	گسترده با «خودرو به شبکه» و «شبکه به خودرو»
استفاده از ذخیره‌سازها	ندارد	ندارد	بهینه و پیشرفته
پیچیدگی مدیریت	ساده	متوسط	بالا
پایداری تأمین برق	تضمین شده	وابسته به مدیریت	تضمین شده

عملکرد سیستم در سناریوی سوم به شرح ذیل است:

- زمان کم‌باری و قیمت پایین برق: در ساعات ابتدایی روز که قیمت برق پایین است، بهره‌بردار از شبکه بالادست توان خریداری می‌کند. همچنین این توان ممکن است به طور مستقیم برای بارهای محلی مصرف شده یا در باتری‌ها ذخیره شود.
- زمان اوج بار و قیمت بالای برق: در ساعات اوج مصرف که قیمت برق افزایش می‌یابد، توان ذخیره‌شده در باتری‌ها با قیمتی بالاتر به شبکه بالادست فروخته می‌شود. همچنین این راهبرد باعث کاهش هزینه کلی سیستم و افزایش سودآوری می‌شود.
- قابلیت «خودرو به شبکه» خودروهای برقی: خودروهای برقی در صورت اتصال به شبکه می‌توانند توان اضافی خود را به شبکه تزریق کنند، به شرطی که انرژی کافی برای بازگشت به منزل باقی بماند. همچنین این ویژگی، علاوه بر کاهش فشار بر شبکه در ساعات اوج بار، به بهره‌برداری اقتصادی‌تر کمک می‌کند.
- مزایای این سناریو عبارتند از:
 - ۱- کاهش هزینه‌ها: نتایج نشان داده که سناریوی سوم، کمترین هزینه را نسبت به دو سناریوی قبلی دارد، زیرا از باتری‌ها و منابع ذخیره‌ساز بهینه استفاده شده است. همچنین فروش برق در ساعات اوج مصرف با قیمت بالا، سودآوری سیستم را افزایش می‌دهد.
 - ۲- افزایش پایداری و قابلیت اطمینان: استفاده از ذخیره‌سازها و خودروهای برقی به مدیریت نوسانات تولید منابع پراکنده (مانند باد و خورشید) کمک می‌کند. همچنین در مواقع اضطراری یا کمبود تولید، این ذخیره‌ها می‌توانند بار شبکه را کاهش دهند.
 - ۳- انعطاف‌پذیری بهره‌برداری: روشن و خاموش کردن منابع تولیدی بر اساس نیاز اقتصادی و شرایط شبکه، بهره‌وری سیستم را بهبود می‌بخشد.
 - ۴- کاهش انتشار آلاینده‌ها: استفاده از خودروهای برقی و ذخیره‌سازها باعث کاهش وابستگی به واحدهای پرهزینه و آلاینده مانند میکروتوربین می‌شود.
- معایب و چالش‌های این سناریو عبارتند از:
 - ۱- پیچیدگی در مدیریت: عملکرد هماهنگ باتری‌ها، خودروهای برقی، و منابع تولید پراکنده نیازمند مدیریت دقیق و الگوریتم‌های پیچیده است. همچنین تنظیم راهبردهای شارژ و دشارژ باتری‌ها (با توجه به قیمت برق و تقاضای لحظه‌ای) می‌تواند دشوار باشد.
 - ۲- وابستگی به زیرساخت‌ها: این سناریو به زیرساخت‌های پیشرفته‌ای مانند ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی و سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند نیاز دارد. همچنین هزینه اولیه نصب و نگهداری این زیرساخت‌ها می‌تواند قابل توجه باشد.
 - ۳- تأثیر حرکت خودروهای برقی: برنامه‌ریزی برای شارژ و دشارژ خودروها نیازمند اطلاعات دقیق درباره زمان و مکان حضور خودروها است. پیش‌بینی ناصحیح می‌تواند کارایی سیستم را کاهش دهد.
 - ۴- فرسایش باتری‌ها: استفاده مکرر از باتری‌ها برای شارژ و دشارژ ممکن است عمر مفید آنها را کاهش دهد، که هزینه‌های نگهداری و جایگزینی را افزایش می‌دهد.

۳-۵ بررسی تأثیرات تغییرات تعرفه انرژی در بهره برداری سیستم

شکل ۴ نشان‌دهنده تأثیر تغییر تعرفه انرژی الکتریکی بر هزینه بهینه است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعرفه برق (خطوطی که با افزایش قیمت مشخص شده‌اند)، هزینه بهینه به طور محسوسی کاهش می‌یابد. این تغییرات به وضوح نشان می‌دهند که با افزایش تعرفه برق شبکه بالادست، سیستم به طور موثری از باتری‌ها برای ذخیره انرژی و فروش آن در زمان‌های اوج تقاضا بهره می‌برد. این پدیده باعث افزایش سود ناشی از سیستم می‌شود، زیرا در چنین شرایطی خرید برق از شبکه بالادست به دلیل هزینه بالای آن به صرفه نیست و باتری‌ها به عنوان یک ذخیره‌ساز انرژی عمل می‌کنند. در نتیجه، با فروش توان ذخیره‌شده به شبکه در ساعات اوج مصرف، بهره‌بردار به سود قابل توجهی دست می‌یابد.

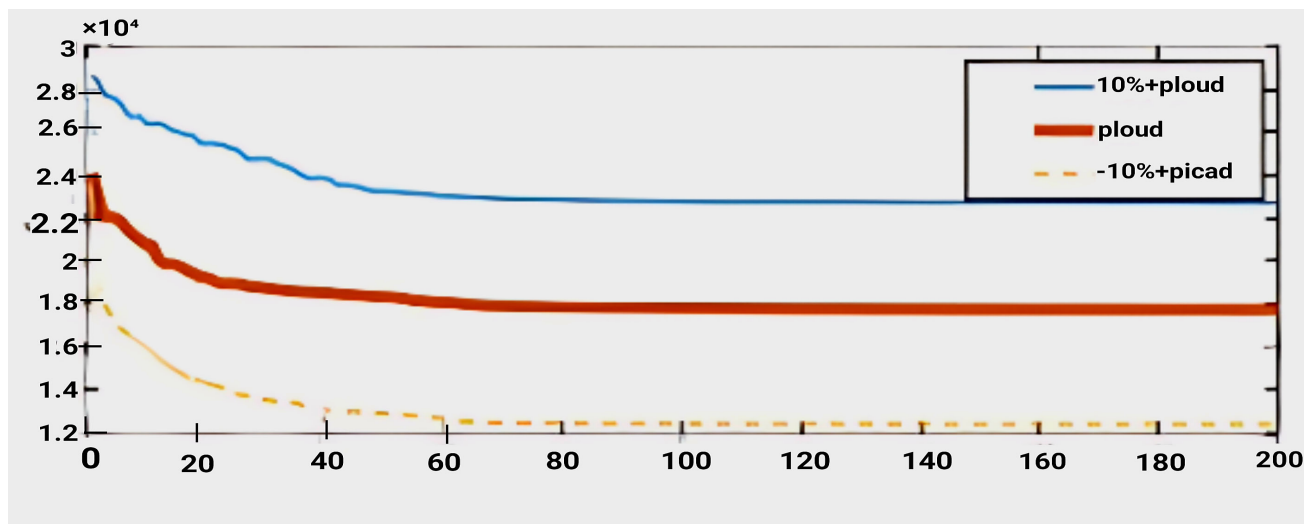


شکل ۴. تأثیرات تغییرات تعرفه انرژی

۴-۵ بررسی تأثیرات تغییرات بار مورد تقاضا در بهره برداری سیستم

شکل ۵ نشان‌دهنده تأثیر تغییر میزان بار مورد تقاضا بر هزینه بهره‌برداری و سود کسب شده در سیستم است؛ به طوری که با افزایش مقدار بار مورد تقاضا، بیشینه سود قابل کسب در سیستم کاهش پیدا می‌کند. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش بار تقاضا، سیستم مجبور است به منابع بیشتری متوسل شود و ذخیره‌سازی و مدیریت بار در این شرایط چالش‌برانگیزتر می‌شود. در واقع، در این سناریو:

- افزایش بار تقاضا منجر به نیاز بیشتر به خرید برق از شبکه می‌شود، که این امر هزینه‌ها را افزایش می‌دهد.
- با توجه به اینکه فروش برق ذخیره‌شده در باتری‌ها در ساعات اوج مصرف، منجر به کسب سود می‌شود، اما افزایش تقاضا و بارهای بیشتر به طور معمول به معنی استفاده بیشتر از منابع تولیدی و ذخیره‌سازی است که در نهایت ممکن است باعث کاهش سود نهایی شود.



شکل ۵. تأثیرات تغییر بار مورد تقاضا

این تغییرات در شکل ۶ به وضوح دیده می‌شود و نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین بار تقاضا و هزینه‌های بهره‌برداری و سود سیستم است.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد که ورود و خروج خودروهای الکتریکی از سیستم و فعالیت‌های «خودرو به شبکه» تأثیر قابل توجهی بر هزینه‌های سیستم و بهره‌برداری دارند. بررسی‌های انجام شده و نتایج بدست آمده که در شکل ۶ نمایش داده شده است، نشان‌دهنده این تأثیرات هستند. در این بررسی‌ها ساعت‌های مختلف روز برای ورود و خروج خودروهای الکتریکی به سیستم در نظر گرفته شده و اثرات آن بر هزینه‌های کلی سیستم از دو منظر ذیل تحلیل شده است.

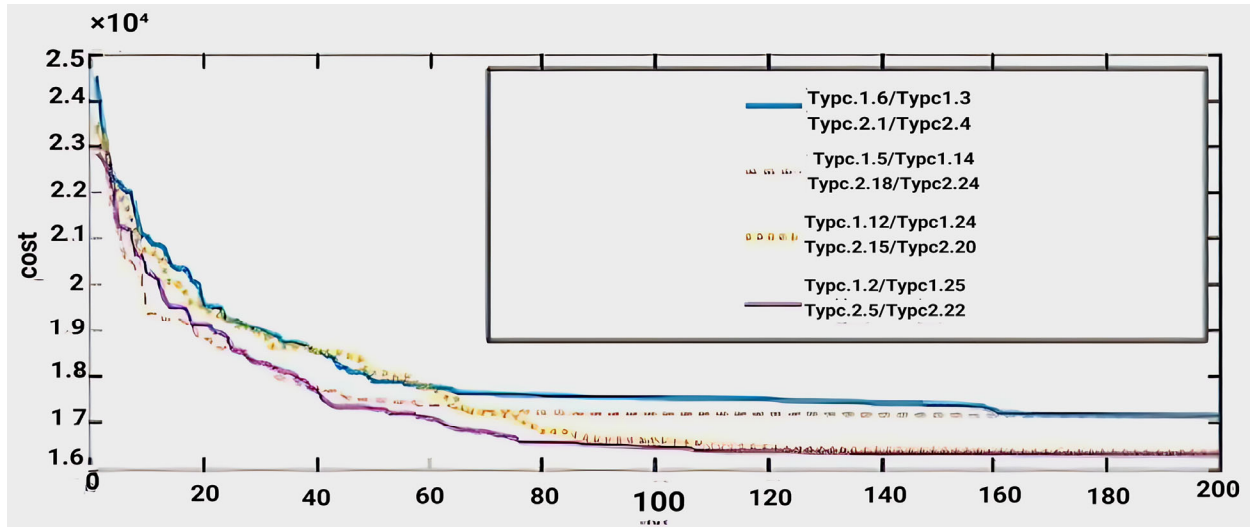
۱. تأثیر خروج خودروهای الکتریکی در ساعات اوج مصرف:

- با افزایش ساعات خروج خودروهای الکتریکی از سیستم و شروع فعالیت «خودرو به شبکه»، هزینه کلی سیستم کاهش می‌یابد.
- زمانی که خودروهای الکتریکی از شبکه جدا می‌شوند و انرژی خود را به شبکه بر می‌گردانند، به خصوص در ساعات اوج مصرف تعرفه‌های بالادستی (۱۲-۷) و (۱۵-۱)، این فرآیند می‌تواند هزینه سیستم را به طور چشمگیری کاهش دهد. در این ساعات، قیمت انرژی شبکه بالادستی بالا است و خودروهای الکتریکی می‌توانند انرژی ذخیره شده خود را به شبکه بازگردانند تا هزینه‌های بالادست کاهش یابد.

۲. فعالیت «خودرو به شبکه» در ساعات پرهزینه:

- در این زمان‌ها، خودروها با استفاده از فعالیت «خودرو به شبکه» می‌توانند به شبکه کمک کنند، چرا که قیمت باتری‌ها در این ساعات پایین‌تر است و به این ترتیب هزینه کمتری برای تأمین برق شبکه خواهد داشت.
- بنابراین، استفاده از باتری‌های خودروهای الکتریکی برای تأمین انرژی در این ساعات هزینه‌ها را کاهش داده و به بهره‌بردار سود بیشتری خواهد رساند.

از این رو استفاده بهینه از عملیات «خودرو به شبکه» و زمان‌بندی دقیق ورود و خروج خودروهای الکتریکی از سیستم به صورت راهبردی می‌تواند هزینه‌های کلی سیستم را کاهش داده و سود بیشتری برای بهره‌بردار ایجاد کند. در این شرایط، خودروهای الکتریکی نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها و پایداری شبکه ایفا می‌کنند، به خصوص در ساعاتی که قیمت انرژی شبکه بالاست.



شکل ۶. تاثیر ساعات ورود و خروج خودروها از سیستم

۵-۵ بررسی اثر عمق دشارژ در هزینه سیستم

همانطور که در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است، عمق دشارژ محدودیت مهمی برای باتری‌های خودروهای الکتریکی است. این محدودیت مشخص می‌کند که باتری نباید کاملاً دشارژ شود تا از کاهش شدید عمر آن جلوگیری شود. در شکل ۵ منحنی اول، اثر عمق دشارژ نادیده گرفته شده است، به این معنی که فرض شده باتری‌ها می‌توانند تمام انرژی ذخیره شده را بدون نگرانی از آسیب به باتری دشارژ کنند و آن انرژی را در اختیار سیستم قرار دهند. در این حالت، اگر باتری‌ها به طور کامل دشارژ شوند، هزینه‌ها به طور موقت کاهش می‌یابد زیرا کل انرژی موجود در باتری‌ها به شبکه باز می‌گردد. این کار ممکن است در کوتاه‌مدت به نفع بهره‌بردار به نظر برسد.

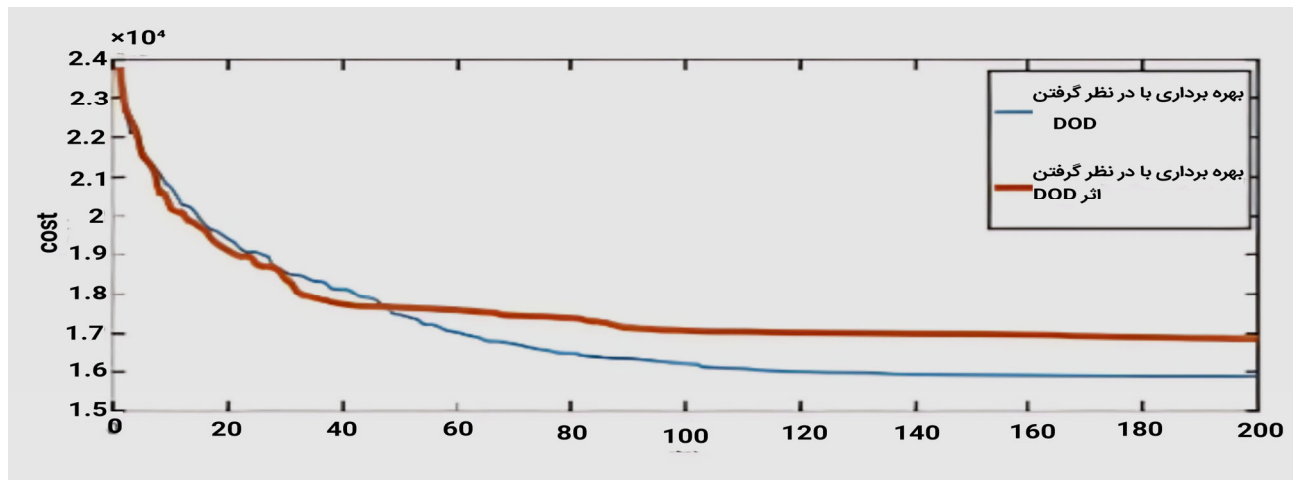
دشارژ کامل باتری‌ها، اگرچه در کوتاه‌مدت هزینه‌ها را کاهش می‌دهد، اما به طور جدی به عمر باتری آسیب می‌زند. باتری‌هایی که به طور مداوم به میزان زیاد دشارژ می‌شوند، ظرفیت خود را از دست می‌دهند و نیاز به تعویض زودتر پیدا می‌کنند. این امر در بلندمدت هزینه‌های بیشتری به بهره‌بردار تحمیل می‌کند.

برای جلوگیری از آسیب به باتری‌ها و افزایش عمر آنها، منحنی Wohler (که در شکل ۷ نشان داده شده است) به کار می‌رود. این منحنی به نسبت دشارژ مجاز باتری‌ها اشاره دارد و نشان می‌دهد که باتری‌ها باید در یک سطح معین از انرژی باقی بمانند تا طول عمر آنها حفظ شود. در شکل دوم (منحنی دوم) که اثر عمق دشارژ در نظر گرفته شده است، با محدود کردن میزان دشارژ باتری‌ها، هزینه‌ها کمی افزایش می‌یابد. این افزایش هزینه‌ها به دلیل حفظ طول عمر باتری است که به نفع سیستم و بهره‌بردار در بلندمدت خواهد بود.

با محدود کردن دشارژ باتری‌ها طبق محدودیت‌های عمق دشارژ، هزینه‌های عملیاتی بلندمدت بهبود می‌یابد، زیرا نیاز به تعویض زود هنگام باتری‌ها کاهش می‌یابد. طول عمر بیشتر باتری‌ها به این معنی است که بهره‌بردار می‌تواند مدت زمان بیشتری از باتری‌ها استفاده کند، که به طور کلی منجر به کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش بهره‌وری سیستم می‌شود.

اگرچه در کوتاه‌مدت، صرف نظر از عمق دشارژ هزینه‌ها کاهش می‌یابد، اما توجه به محدودیت‌های عمق دشارژ و جلوگیری از دشارژ کامل باتری‌ها در بلندمدت به نفع بهره‌بردار خواهد بود. افزایش هزینه‌ها در شرایطی که عمق دشارژ رعایت شود، در نهایت منجر به

افزایش عمر باتری‌ها و کاهش هزینه‌های تعویض باتری می‌شود. بنابراین، مدیریت مناسب عمق دشارژ به بهره‌بردار اجازه می‌دهد که به بهینه‌ترین شکل ممکن از منابع انرژی استفاده کند و از زیان‌های بلندمدت جلوگیری نماید.



شکل ۷. هزینه‌های سیستم با در نظر گرفتن و صرف نظر کردن از اثر عمق دشارژ

در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به «تولیدات پراکنده» جلب شده است. این منابع تولیدی کوچک معمولاً در نزدیکی مصرف‌کنندگان قرار دارند و به شبکه متصل می‌شوند. از مزایای تولیدات پراکنده می‌توان به هزینه راه‌اندازی و نصب کم، نصب آسان، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشید و باد، و کمک به کاهش آلودگی‌ها و حفاظت از محیط‌زیست اشاره کرد. با این حال، از آنجا که منابع تجدیدپذیر ناپایدار و متغیر هستند (مثلاً انرژی خورشیدی و بادی)، پایداری شبکه برق ممکن است به خطر بیفتد و این مسئله می‌تواند در برخی مواقع موجب ناتوانی در پاسخگویی به تقاضای بار شود. چالش‌های استفاده از خودروهای برقی در شبکه عبارتند:

- یکی از چالش‌های جدید در سیستم‌های برق هوشمند، استفاده از خودروهای برقی به عنوان ذخیره‌سازهای متحرک است.
- این خودروها می‌توانند در مواقع اوج تقاضا به شبکه انرژی بدهند یا در مواقع کاهش بار از شبکه برق بگیرند، اما رفتار مالکان خودروهای برقی دارای قطعیت نیست و این عامل چالشی برای مدیریت بهینه مصرف و دوشاخه‌سازی انرژی ایجاد می‌کند.
- به عنوان مثال، ممکن است زمان حرکت خودروها، مسیر حرکت و نحوه اتصال به شبکه غیرقابل پیش‌بینی باشد. این عدم قطعیت می‌تواند مدیریت دقیق مصرف انرژی را پیچیده کند.

شهرهای هوشمند و اهمیت آن‌ها عبارتند از:

- شهرهای هوشمند به دلیل مشکلات زیست‌محیطی، گرمایش جهانی و افزایش آلودگی گازهای گلخانه‌ای در مرکز توجه قرار گرفته‌اند. این شهرها به دنبال راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری هستند.
- هدف اصلی شهرهای هوشمند این است که با استفاده از فناوری‌های پیشرفته، از جمله تولیدات پراکنده و سیستم‌های انرژی متصل به هم، بهره‌وری انرژی را افزایش داده و رضایت بیشتری را برای ساکنان فراهم کنند.

- این شهرها به‌طور فعال از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده کرده و به دنبال پیاده‌سازی سیستم‌هایی هستند که از آنها برای انتقال و بهینه‌سازی انرژی بین بخش‌های مختلف شبکه قدرت استفاده کنند.

چالش‌های اتصال و زیرساخت‌های مورد نیاز در این شهرهای هوشمند عبارتند از:

- یکی از مهم‌ترین نیازها برای اتصال سیستم‌های مختلف و انتقال انرژی بین آنها، زیرساخت‌های لازم است. برای اینکه شبکه‌های مختلف و منابع تولید پراکنده به هم متصل شوند و بتوانند انرژی را به یکدیگر انتقال دهند، نیاز به وجود زیرساخت‌های فنی و ارتباطی است.
- ایجاد این زیرساخت‌ها مستلزم هزینه‌های زیاد است که ممکن است برای بسیاری از بهره‌برداران و دولت‌ها چالش‌برانگیز باشد.

۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش، به بررسی بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی در شهرهای هوشمند پرداخته شد. هدف اصلی این پژوهش، یافتن روشی برای تأمین تقاضای بار شبکه با کمترین هزینه ممکن بود. به همین منظور، ابتدا تعریفی از شهرهای هوشمند ارائه شد و بخش‌های مختلف این نوع شهرها، همراه با معادلات ریاضی مربوطه مورد بررسی قرار گرفت. الگوریتم «بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی» به عنوان روش اصلی بهینه‌سازی انتخاب شد و مراحل انجام این الگوریتم به تفصیل توضیح داده شد.

در این پژوهش، یک شهر هوشمند با دو نیروگاه خورشیدی و دو نیروگاه بادی یکسان، به همراه میکروتوربین، پیل سوختی و خودروهای الکتریکی مدل‌سازی شد. نیروگاه‌های بادی و خورشیدی به دلیل بازدهی بالا و هزینه‌های بهره‌برداری پایین، نقش اساسی در کاهش هزینه‌ها داشتند. همچنین، باتری‌ها به عنوان ذخیره‌ساز انرژی در سیستم به کار گرفته شدند تا در زمان‌های ارزان‌تر برق، انرژی ذخیره و در ساعات پیک بار به شبکه منتقل شود.

سه سناریو مختلف در این پژوهش بررسی شد:

۱. سناریو اول، جایی که خودروهای الکتریکی وارد شبکه نمی‌شوند و منابع تولید پراکنده قابلیت خاموش و روشن شدن ندارند.
۲. سناریو دوم، که منابع تولید پراکنده قابلیت خاموش و روشن شدن دارند، اما خودروهای الکتریکی وارد شبکه نمی‌شوند.
۳. سناریو سوم، که کامل‌ترین حالت است و حضور خودروهای الکتریکی به همراه منابع تولید پراکنده با قابلیت خاموش و روشن شدن مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در سناریو سوم که خودروهای الکتریکی در شبکه حاضر هستند، هزینه‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. خودروهای الکتریکی با استفاده از قابلیت شارژ و دشارژ خود، انرژی را به شبکه منتقل می‌کنند و باعث کمینه شدن هزینه‌های کلی سیستم می‌شوند.

در نهایت، مطالعات آینده می‌تواند به طراحی شبکه‌های بی‌سیم پرداخته و این امکان را فراهم آورد که خودروهای الکتریکی در زمان حرکت نیز بتوانند به شبکه متصل شوند و انرژی را به آن منتقل کنند. همچنین، می‌توان از تبادل انرژی بین خودروهای الکتریکی در حمل‌ونقل عمومی و شبکه بهره‌مند شد و کارایی شبکه‌های انرژی را در شهرهای هوشمند بهبود بخشید. نتیجه‌گیری این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از منابع تجدیدپذیر، خودروهای الکتریکی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به‌طور مؤثر می‌تواند به بهینه‌سازی هزینه‌ها و افزایش پایداری شبکه‌های قدرت در شهرهای هوشمند منجر شود.

۷ مراجع

- 1) Ali, M. H., Wu, B., & Dougal, R. A. (2021). An overview of SMES applications in power and energy systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 1(1), 38–47.
- 2) Calvillo, C. F., Sanchez-Mirallas, A., & Villar, J. (2019). Energy management and planning in smart cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 273–287.
- 3) Casti, J. L. (2012). *X-Events: Complexity overload and the collapse of everything*. HarperCollins.
- 4) Chourabi, H. (2019). Understanding smart cities: An integrative framework. In *2012 45th Hawaii International Conference on System Science (HICSS)* (pp. 2289–2297).
- 5) Colldahi, C., Frey, S., & Kelemen, J. E. (2024). *Smart cities: Strategic sustainable development for an urban world* [Master's thesis, Karlskrona University].
- 6) Cossent, R. T., Gomez, T., & Frias, P. (2023). Towards a future with large penetration of distributed generation: Is the current regulation of electricity distribution ready? Regulatory recommendations under a European perspective. *Energy Policy*, 37(3), 1145–1155.
- 7) Cristofer, C., Notton, G., Ezzat, M., Stoyanov, L., Canaletti, J. L., & Lazarov, V. (2023). Pumped hydroelectric storage coupling wind-solar resources: A solution for increasing renewable energy on islands' electrical grid. In *International Conference on Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies (ESD)* (pp. 1–11).
- 8) Ferraro, S. (2023). *Smart cities, analysis of a strategic plan* [Master's thesis].
- 9) Hu, W., Su, C., Chen, Z., & Bak-Jensen, B. (2015). Optimal operation of plug-in electric vehicles in power systems with high wind power penetrations. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(3), 577–585.
- 10) Jiweng, J. (2021). Stochastic energy scheduling in microgrids with intermittent renewable energy resources. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4), 1876–1883.
- 11) Kabalci, E., & Kabalci, Y. (2023). Introduction to smart grid architecture. In *Smart grids and their communication systems* (pp. 3–45). Springer.
- 12) Kalogirou, S. A. (2018). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231–295.
- 13) Karadag, T. (2023). *An evaluation of the smart city approach* [Master's thesis, Middle East Technical University].
- 14) Karekezi, S. K., & Lata, S. T. C. (2021). Traditional biomass energy: Improving its use and moving to modern energy use. Presented at the Secretariat of the International Conference for Renewable Energies, Bonn.
- 15) Kornelakis, A., & Koutroulis, E. (2019). Methodology for the design optimization and the economic analysis of grid-connected photovoltaic systems. *IET Renewable Power Generation*, 3(4), 476–492.
- 16) Ma, Y., Kelman, A., Daly, A., & Borrelli, F. (2020). Predictive control for energy-efficient buildings with thermal storage: Modeling, simulation, and experiments. *IEEE Control Systems*, 32(1), 44–46.
- 17) Mardacany, E. (2018). Smart cities characteristics: Importance of built environment components. In *IET Conference on Future Intelligent Cities* (June 11, 2014).
- 18) Masera, M. (2010). Governance: How to deal with ICT security in the power infrastructure? In Z. Lukszo, G. Deconinck, & M. P. C. Weijnen (Eds.), *Securing electricity supply in the cyber age: Exploring the risks of information and communication technology in tomorrow's electricity infrastructure*. Springer. <https://doi.org/10.1007>.
- 19) Mo, Y., Kim, T. H.-J., Brancik, K., Dickinson, D., Lee, H., Perrig, A., & Sinopoli, B. (2012). Cyber-physical security of a smart grid infrastructure. *Proceedings of the IEEE*, 100(1), 195–209.
- 20) Morales, J. (2020). Impact on system economics and security of a high penetration of wind power. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(22), 11443–11452.
- 21) Nahon, T., & Scholl, T. A. (2022, September). Smart city as urban innovation: Focusing on management, policy, and context. In *Proceedings of the 5th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance*. ACM Press.
- 22) Paradysz, J. (2021). *Chances and threats for security of the Polish power sector resulting from digitalization* [Diploma thesis, Rzeszów University of Technology]. (In Polish).
- 23) Ruiz-Romero, S., Colmenar-Santos, A., Mur-Perez, F., & Lopez-Rey, A. (2021). Integration of distributed generation in the power distribution network: The need for smart grid control systems, communication, and equipment for a smart city—Use cases. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 223–234.

- 24) Sarkar, M., & Viramgami, R. (2021). Smart cities: A study of prospects beyond information and communication technology (ICT). *International Advanced Research Journal in Science, Engineering, and Technology*, 3(12), 36–41.
- 25) Saurugg, H. (2020, February 20). *Blackout-Vorsorge Vortrag mit Blackout-Experte Herbert Saurugg* [Lecture on blackout]. St. Pölten, Austria. Available online: <https://www.youtube.com/watch?v=wQrJ-BDNSIw> (accessed on June 12, 2021).
- 26) Sinkiene, J., Grumadaite, K., & Radzvickiene, L. L. (2024). Diversity of theoretical approaches to the concept of a smart city. In *8th International Scientific Conference*. <http://dx.doi.org/10.3846/bm.2014.112>.
- 27) Usaola, J. (2017). Operation of concentrating solar power plants with storage in spot electricity markets. *IET Renewable Power Generation*, 6(1), 50–66.
- 28) Villar, J., Trigo, T., Diaz, C. A., & Gonzalez, P. (2019). Cost-benefit analysis of plug-in electric vehicle penetration. In *European Energy Market (EEM), International Conference* (pp. 1–8).
- 29) Walrawens, N. (2021). Qualitative indicators for smart city business models: The case of mobile services and applications. *Telecommunications Policy*, 39, 218–240.
- 30) Walters, D. (2021). Smart cities, smart places, smart democracy: Form-based codes, electronic governance, and the role of place in making smart cities. *Intelligent Buildings International*, 3(3), 198–211.
- 31) Zhang, X., Liu, D., Zhan, C., & Tse, C. K. (2017). Effects of cyber coupling on cascading failures in power systems. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 7(2), 228–238. <https://doi.org/10.1109/JETCAS.2017>.

Research Paper

Optimizing Energy Supply in Smart Cities for Fuel Crisis Management using Bio-Geographical OptimizationMohammad Eskandari¹, Masoud Darabi², Mohammad Reza Salehi³

1. Assistant Professor, faculty of Engineering and Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Iran
2. Assistant Professor, faculty of Engineering and Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Iran
3. Master's degree in Passive Defense, faculty of Engineering and Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Iran

Received:08/12/2024

Accepted:22/07/2025

Abstract

The growing population has led to issues such as fossil fuel shortages and increased greenhouse gas emissions, prompting the search for solutions to address these challenges. One such solution is the transformation of conventional cities into smart cities. The aim of this research is to reduce costs in smart cities. In Iran, the adoption of innovative approaches for optimizing urban planning, such as the use of metaheuristic algorithms and artificial intelligence, is essential. One of these algorithms is Bio-Geographical Optimization, which is inspired by nature. This descriptive and analytical study examines the application of the Bio-Geographical Optimization algorithm to analyze fossil fuel shortages and the increase in greenhouse gases. In this algorithm, each urban area is considered as an individual entity with its own suitability index. Data analysis using this algorithm was conducted in MATLAB software. Optimization is performed through the Bio-Geographical Optimization algorithm, which is an evolutionary algorithm. Three modifications have been applied to the algorithm, leading to improved optimization results. In this study, the power generated by solar and wind power plants is calculated and subtracted from the total demand on the network. The amount of demand that needs to be supplied by micro turbines, fuel cells, and batteries is optimized using a cost-minimizing objective function. Optimization was carried out for 24 hours and analyzed under three scenarios. The results show that the presence of electric vehicles and the ability to turn distributed energy resources on and off significantly reduces system costs. In the complete scenario, the use of electric vehicle charging and discharging minimizes the overall network costs. This study demonstrates that the integration of these technologies can contribute to cost optimization and energy efficiency in smart grid networks.

Keywords: Electric vehicles, Smart cities, Distributed generation, Bio-Geographical Optimization.

¹ Eskandarim@mut.ac.ir² masuod.darabi@gmail.com³ Mohamadrezasalehi5205@gmail.com