مدیریت اقتصادی-زیست‌محیطی انرژی در یک ریزشبکه مبتنی بر روش بهبود یافته HBMO و منطق فازی

مرتضی حق‌شناس[۱]، محمد حاجی‌بابایی[۲] ، محمود عبادیان[۳]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۹/۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱۲/۳

چکیده:

در این مقاله، منظور از مدیریت اقتصادی زیست‌محیطی انرژی در یک ریز شبکه (میکرو شبکه) تعیین میزان مشارکت هر یک از منابع تولید پراکنده در تأمین تقاضای بار محلی با هدف کاهش همزمان هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی‌های زیست محیطی است. ظرفیت واحدهای نصب شده در ریزشبکه مورد مطالعه در این مقاله به گونه‌ای است که همواره بخشی از انرژی مورد تقاضای بار توسط شبکه سراسری تأمین می‌گردد. از این‌رو، با توجه به اهداف مورد نظر در بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه، برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی با توجه به نحوه تعامل ریزشبکه با شبکه بالادست انجام گرفته است. همچنین اثر نوسانات بازار برق و میزان آلودگی متناظر با انرژی دریافت شده از شبکه سراسری در مدل‌سازی اهداف مسأله مورد توجه قرار گرفته است. در حل مسأله مدیریت اقتصادی زیست‌محیطی انرژی از روش بهینه سازی چند هدفه HBMO مبتنی بر معیار پارتو و منطق فازی استفاده شده است که از مهمترین ویژگی‌های این روش می‌توان به جستجوی مناسب، به‌گزینی، ارتقا و تقاطع نسل‌ها در ایجاد جواب‌های جدید اشاره کرد. در انتها، نتایج حاصل از این روش برای سه سناریو متفاوت ارائه و با نتایج سایر روش‌ها مقایسه شده است. این مقایسه برتری روش پیشنهادی را برای تعیین میزان مشارکت هر یک از منابع تولید پراکنده در تغذیه بار محلی و همچنین برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی:

مدیریت انرژی در ریزشبکه، منابع تولید پراکنده، ذخیره سازی انرژی، بهینه‌سازی چند هدفه

۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت دانشگاه بیرجند (نویسنده مسئول) Haghshenas.M@birjand.ac.ir
۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت دانشگاه بیرجند Mohammad.Hajibabaee@birjand.ac.ir
۳) دانشیار گروه قدرت دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند Mahmoud_Ebadian@yahoo.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

مقدمه

امروزه با توجه به بحران های زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت های فسیلی، علاوه بر کاهش هزینه بهره‌برداری از نیروگاه ها، کمینه سازی میزان آلودگی متناظر با انرژی تولید شده نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این‌رو، در چند دهه اخیر بکارگیری واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدید پذیر به منظور کاهش آلودگی‌های زیست محیطی متناظر با تولید انرژی الکتریکی رایج شده است. در پی گسترش استفاده از تولیدات پراکنده در سیستم قدرت، استفاده از ریزشبکه‌ها مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. ریز شبکه یک شبکه محلی شامل واحدهای تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و بارهای کنترل‌پذیر است که می‌تواند در دو حالت متصل به شبکه سراسری یا مستقل از آن (جزیره‌ای) مورد بهره‌برداری قرار گیرد [۸]. استفاده بهینه از ریزشبکه‌ها موجب بی‌نیازی از احداث شبکه‌های انتقال جدید، کاهش آلودگی محیط زیست، کاهش تلفات انرژی در شبکه، افزایش کیفیت توان و نیز ایجاد راهکارهای مناسب جهت استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی می‌شود [۴ و ۱۸]. هر ریزشبکه دارای یک واحد مدیریت مرکزی است که در آن با پایشگری وضعیت بارها و تولید منابع، تصمیمات لازم در راستای بهینه‌سازی عملکرد آن با توجه به اهداف و محدودیت‌های تعیین شده اتخاذ می‌شود[۶]. در این راستا، اثرات استفاده از یک کنترل‌کننده مرکزی در ریزشبکه برای دستیابی به یک برنامه هماهنگ در [۱۳] بررسی شده است. مولفین در [۵] نقش مرکز مدیریت را با هدف بهره‌برداری بهینه و مدیریت تولیدات پراکنده بررسی کرده‌اند و تبادل انرژی با شبکه بالادست را نیز در نظر گرفته‌اند. بهینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری از ریزشبکه با در نظر گرفتن اثر سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی هدفی است که در مرجع [۲] با روش تجمع ذرات و در [۱۷] با روش برنامه‌ریزی خطی دنبال شده است. در مرجع [۹] مدیریت ریزشبکه با در نظر گرفتن نوسانات بازار برق بررسی شده است. مراجع [۱و۱۲] بهینه‌سازی هزینه‌ها را با در نظر گرفتن اثر آلودگی‌های زیست محیطی انجام داده‌اند. در مرجع [۱۱] مدیریت تولید ریزشبکه با استفاده از یک روش بهینه‌سازی تک هدفه برای دو سناریو کاملا مستقل به منظور بهینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی انجام گرفته است.

در این مقاله، مسأله مدیریت اقتصادی-زیست‌محیطی انرژی در یک ریزشبکه برای عملکرد در حالت متصل به شبکه سراسری به منظور بهینه‌سازی همزمان هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی با در نظر گرفتن نوسانات قیمت بازار برق برای یک بازه زمانی مشخص توسط روش چند هدفه HBMO[1] مبتنی بر معیار پارتو و منطق فازی حل شده و نتایج حاصل از روش پیشنهادی با سایر روش‌ها مقایسه می‌گردد.

1) Honey Bees Mating Optimization - HBMO

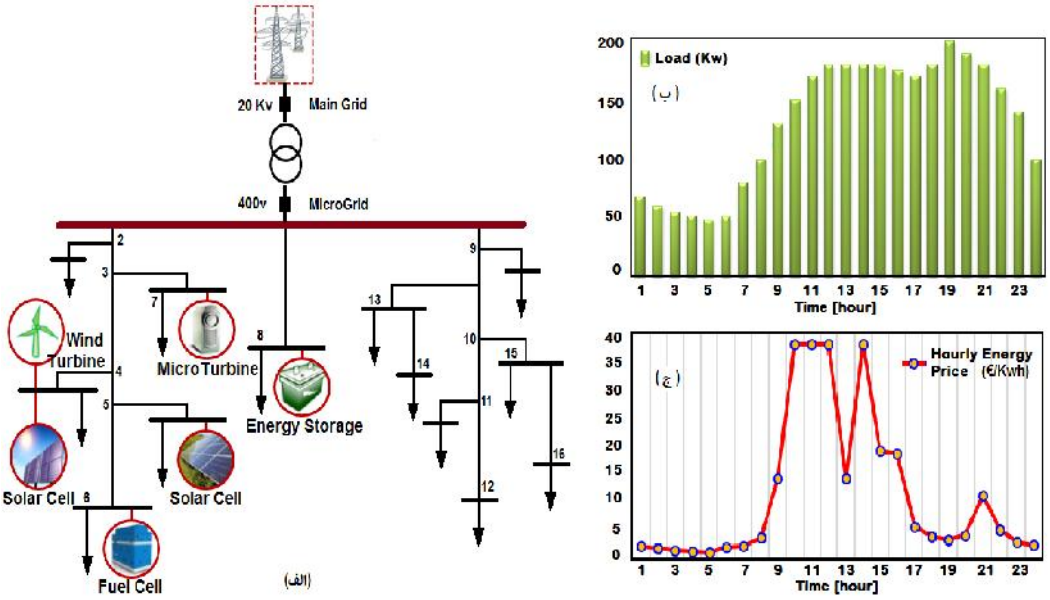
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

سیستم مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه در این مقاله ریزشبکه‌ای با منابع تولید پراکنده متنوع شامل واحدهای فتوولتائیک، پیل سوختی، توربین بادی و میکروتوربین است. ساختار این ریزشبکه در حالت متصل به شبکه توزیع در شکل ۱-الف نشان داده شده است. در این بررسی، منحنی تغییرات بار ریزشبکه به‌صورت شکل ۱ـ ب در نظر گرفته شده است. قیمت ساعتی بازار برق برای یک دوره ۲۴ ساعته مطابق شکل ۱ـ ج ، ضرایب هزینه، ضرایب انتشار گازهای آلاینده و ظرفیت نصب شده هرکدام از منابع تولید پراکنده در جدول (۱) و اطلاعات ساختاری ریزشبکه مطابق با داده‌های [۵] در نظر گرفته شده است.

جدول ۱) اطلاعات واحدهای تولید پراکنده فعال در ریزشبکه [۵]

Type	P_{min} (kw)	P_{max} (kw)	b_i (€ct/kwh)	C_i (€ct/h)	b_i (G/kwh)
PV1	0	3	54.84	0	0
PV2	0	10	54.84	0	0
WT	0	15	10.63	0	0
MT	6	30	4.37	85.06	724.6
FC	3	30	2.86	255.8	489.4



شکل ۱. الف) ساختار ریزشبکه مورد مطالعه [۵] ب) پروفیل بار ریزشبکه در ۲٤ ساعت

ج) قیمت پیشنهادی بازار برای ۲٤ ساعت

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

مدل‌سازی توابع هدف

تابع هزینه بهره‌برداری از ریزشبکه

تابع هزینه بهره‌برداری شامل هزینه‌های تولید توان در ریزشبکه و انرژی دریافت شده از شبکه توزیع به صورت رابطه زیر مدل‌سازی شده است[۱۲].

$$C(P)=\sum_{t=1}^{T}\left\{\sum_{i=1}^{N}B_i(P_{g_i}(t))+P_G(t).B_G(t)\right\} \quad (۱)$$

در رابطه فوق، T بیانگر طول دوره مورد بررسی بر حسب ساعت، N تعداد منابع تولید پراکنده فعال در ریزشبکه، $P_{g_i}(t)$ توان اکتیو تولیدی منبع iام و $P_G(t)$ توان اکتیو دریافتی از شبکه توزیع در ساعت tام می‌باشد. همچنین $B_G(t)$ قیمت ساعتی انرژی شبکه و $B_i(P_{g_i}(t))$ قیمت پیشنهادی iامین واحد تولید پراکنده برای تولید P_{g_i} کیلووات توان در ساعت tام از دوره مورد مطالعه است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۲].

$$B_i(P_{g_i}(t))=b_i.P_{g_i}(t)+C_i \quad (۲)$$

که در آن، b_i و c_i ضرایب تابع هزینه برای واحد iام هستند.

تابع انتشار آلودگی محیط زیست

در مدل‌سازی تابع آلودگی، علاوه بر انتشار آلودگی توسط منابع تولید توان در ریزشبکه، میزان آلودگی متناظر با توان دریافتی از شبکه توزیع نیز به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$E(P)=\sum_{t=1}^{T}\left\{\sum_{k=1}^{M}\left\{\sum_{i=1}^{N}P_{g_i}(t).EF_{i,k}+P_G(t).EF_{G,k}(t)\right\}\right\} \quad (۳)$$

که در آن، M بیانگر تعداد گازهای آلاینده است. همچنین $EF_{i,k}$ و $EF_{G,k}$ ضرایب انتشار آلودگی متناسب با توان تولیدشده توسط منابع تولید پراکنده و توان دریافتی از شبکه توزیع می‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

مدل‌سازی قیود و محدودیت‌ها

محدودیت تولید توان توسط منابع تولید پراکنده

در برنامه‌ریزی عملکرد واحدهای تولید پراکنده باید توان اکتیو اختصاص داده شده به هر منبع در محـدوده مجـاز تولیـد آن واحد باشد. این محدودیت باتوجه به مسائل فنی و شرایط اقتصادی حاکم بر سیستم به‌صورت زیر بیان می‌شود[۱۸].

$$P_{g_i}^{\min} \le P_{g_i} \le P_{g_i}^{\max} \tag{۴}$$

ضمانت تغذیه بارهای محلی

نحوه برنامه‌ریزی تولید منابع تولید پراکنده و مدیریت تبادل انرژی با شبکه توزیع با در نظر گرفتن قیمت انرژی الکتریکی و وضعیت شارژ و دشارژ باتری‌ها در هر ساعت باید به نحوی باشد که همواره انرژی تقاضا شده توسط بار برآورده شـود. ایـن امر به صورت یک محدودیت مطابق با رابطه زیر در نظر گرفته شده است.

$$\sum_{i=1}^{N} P_{g_i}(t) + P_G(t) \ge \sum_{j=1}^{L} P_{load_j}(t) \pm P_B(t) \tag{۵}$$

که در آن، $P_{load}(t)$ توان مورد تقاضای بار و $P_B(t)$ توان سیستم ذخیره‌ساز انرژی است که با توجـه بـه وضـعیت شـارژ یـا دشارژ شدن باتری‌ها در هر ساعت می‌تواند علامت آن متفاوت باشد.

وضعیت ذخیره‌سازی انرژی در ریزشبکه

حضور بارهای غیر قابل قطع در ریزشبکه این محدودیت را ایجاد می‌کند که میزان انرژی ذخیره شده در باتری‌هـا نبایـد از حد مشخصی کمتر شود. از این‌رو، وضعیت شارژ باتری‌ها (SOC) را در هر زمان می‌توان به‌صورت زیر بیان کـرد[۱۹و۱۵]. در این زمینه، مدل‌های متفاوت دیگری نیز در [۱۲و۲۰] ارائه شده است.

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-¢(t)) + ¦_{charge}.\max(0, P_B(t)).\Delta t + \frac{1}{¦_{discharge}}\min(0, P_B(t)).\Delta t \tag{۶}$$

در رابطه فوق، $¦_{bat}$ بیانگر راندمان شارژ باتری‌ها، ¢ ضریب دشارژ خودی سیستم ذخیره‌ساز است و به پارامترهای باتری‌ها وابسته است. Δt طول یک بازه زمانی می‌باشد که در این مقاله، یک سـاعت در نظـر گرفتـه شـده اسـت. در ایـن حالـت، محدودیت شارژ باتری‌ها به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۹و۳].

$$SOC_{\min} \le SOC(t) \le SOC_{\max} \tag{۷}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

الگوریتم بهینه‌یابی جفت گیری زنبور عسل (HBMO)

الگوریتم بهینه‌یابی HBMO اولین بار توسط دکتر امید بزرگ حداد در سال ۲۰۰۵ پیشنهاد شد [۱۴]. این الگوریتم الهام گرفته از فرایند جفت‌گیری زنبورهای واقعی می‌باشد. یک کندوی زنبور عسل در طبیعت به طور معمول شامل یک یا چند ملکه و تعداد زیادی زنبور نر و زنبور کارگر می‌باشد. ملکه اصلی‌ترین نقش را در تولید مثل و تخم گذاری ایفا می‌کند و زنبورهای نر در نقش پدران کندو وظیفه تشدید ژن‌های ملکه را بدون تغییر در ترکیب ژنتیک آن بر عهده دارند. در این میان، وظیفه زنبورهای کارگر بچه‌داری و در برخی موارد تخم‌گذاری می‌باشد. بچه زنبورها از تخم‌های بارور و نا بارور حاصل می‌شوند، به این گونه‌ای که از دسته اول ملکه و زنبورهای کارگر و از دسته دوم زنبورهای نر تولید می‌گردد. پرواز جفت‌گیری توسط رقص مخصوصی از جانب ملکه آغاز می‌شود. در این پرواز، زنبورهای نر ملکه را تعقیب کرده و عمل جفت‌گیری با ملکه را در فضا انجام می‌دهند. در هر پرواز جفت‌گیری، به طور معمول ملکه با ۷ تا ۲۰ زنبور نر جفت‌گیری می‌کند. در این پرواز، ملکه توسط جمعیت انبوهی از زنبورهای نر تعقیب می‌شود و سرانجام زنبورهای نر موفق به جفت‌گیری با ملکه می‌میرند، ولی ملکه اسپرم آنها را نگه می‌دارد. این بدان معناست که ملکه چندین بار و با چندین زنبور نر جفت‌گیری می‌کند ولی هر زنبور نر تنها قادر به یک بار جفت‌گیری با ملکه است. در واقع، پرواز جفت‌گیری را می‌توان به یک جابجایی در فضا و مکان تشبیه کرد که در آن ملکه در نقاط مختلف با سرعت‌های متفاوت به پرواز در می‌آید و با زنبورهای نر موجود در آن فضا به طور تصادفی جفت‌گیری می‌کند. بدیهی است که در آغاز پرواز جفت‌گیری انرژی ملکه در حد مشخصی بوده و در انتهای مسیر یعنی زمانی که ملکه به کندو باز می‌گردد انرژی او کاهش یافته و به نزدیکی صفر می‌رسد. از طرف دیگر، ممکن است قبل از صفر شدن انرژی ملکه، محفظه اسپرم آن پر شده و حتی در صورت داشتن انرژی نیز به کندو باز گردد. ساختار این الگوریتم در ۵ گام اصلی در زیر بیان شده است.

۱. جفت‌گیری ملکه

الگوریتم با پرواز جفت‌گیری آغاز می‌شود و ملکه (جواب برتر) به طور تصادفی جفت‌های خود را از بین زنبورهای نر برای تولید جمعیت جدید انتخاب می‌کند. احتمال جفت‌گیری هر زنبور نر با ملکه به صورت رابطه زیر مدل می‌شود.

$$prob(Q,D) = e^{\frac{-\Delta(f)}{S(t)}} \tag{۸}$$

که در آن، $prob(Q,D)$ احتمال یک جفت‌گیری موفق بین زنبور نر Dام و ملکه Q ، $\Delta(f)$ قدر مطلق اختلاف بین تابع برازش ملکه و زنبور نر و $S(t)$ سرعت ملکه در لحظه t می‌باشد. واضح است که رابطه (۸) به صورت یک تابع نورد شده عمل می‌کند. در این حالت، سرعت و انرژی ملکه بعد از هر بار جفت‌گیری طبق روابط زیر کاهش می‌یابد:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

$$S(t+1) = \sim \times S(t) \quad (۹)$$

$$E(t+1) = E(t) - ¥ \quad (۱۰)$$

که در آن، ~و ¥ضرایبی بین [۱ ۰] برای کاهش سرعت و انرژی ملکه بعد از هر بار جفت‌گیری است.

۲. تولید جمعیت جدید زنبورها

نسل جدید زنبورها (جواب‌های آزمایشی) با جابجایی ژن‌های ملکه و زنبورهای نر به صورت زیر تولید می‌شوند:

$$child = parent1 + \quad .(parent2 - parent1) \quad (۱۱)$$

که در آن، یک عدد تصادفی بین صفر و یک است.

۳. ارتقای نسل زنبورها

در این مرحله، زنبورهای کارگر به پرورش و ارتقای نسل بچه زنبورها طبق رابطه (۱۲) می‌پردازند. در این رابطه، بـه طـور تصادفی بچه تولید می‌شود در حالی که ε یک عدد ثابت است.

$$brood_i^k = brood_i^k \pm (¢ + £).brood_i^k \quad , \quad ¢ \in [0,1], \quad 0 < £ < 1 \quad (۱۲)$$

۴. مرتب کردن جمعیت جدید و به گزینی ملکه

در این مرحله، بعد از مرتب کردن بچه زنبورها، بچه زنبور برتر با ملکه موجود مقایسه می‌شـود و بـه شـرط داشـتن میـزان برازنگی بهتر جایگزین ملکه می‌شود. در غیر این صورت، پرواز جفت‌گیری بعدی توسط ملکه موجود انجام می‌گیرد.

۵. بررسی شرط خاتمه

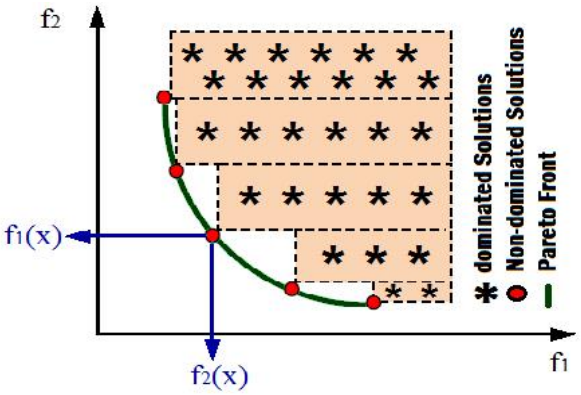
پس از محقق شدن شرط خاتمه، ملکه به عنوان جواب نهایی مسأله انتخاب می‌شود. در غیر این صورت، نسل جدیـدی از زنبورهای نر تولید شده و کلیه مراحل قبل تا رسیدن به شرط مورد نظر تکرار می‌گردد.

بهینه‌سازی چند هدفه و مفهوم بهینه پارتو

یک روش مرسوم در حل مسائل چند هدفه، استفاده از روش ضرایب وزنی است. این روش بر اساس عملکرد طبیعی انسان در تصمیم‌گیری‌های چند معیاره بنا شده است. در این روش با اختصاص ضرایب وزنی به هر یـک از اهـداف، مسـأله چنـد

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

هدفه را به صورت یک ترکیب خطی وزن‌دار از اهداف مسأله بیان کرده و با روش‌های بهینه‌سازی تک هدفه حل می‌کنند. از معایب این روش می‌توان به از دست رفتن بخشی از پاسخ‌های بهینه و وابستگی جواب‌ها به ضرایب وزنی اشاره کرد. همچنین برخی مسائل به گونه‌ای است که در آن اهداف قابل ترکیب نیستند. در این حالت، مفهوم بهینه پارتو بیان می‌دارد اگر چه نمی‌توان یک نقطه بهینه را همزمان برای تمام توابع هدف به دست آورد، اما می‌توان یک مجموعه از پاسخ‌ها را به گونه‌ای پیدا کرد که در فضای جستجو از پاسخ‌های دیگر بهتر باشد. به این پاسخ‌ها، مجموعه پاسخ‌های بهینه پارتو و به نقاط دیگر فضای جستجو مجموعه پاسخ‌های مغلوب می‌گویند. با توجه به تعاریف فوق، نقطه ایده‌آل نقطه‌ای است که در آن مقادیر تمام توابع هدف کمینه باشد. این مفهوم در شکل (۲) نشان داده شده است. انتخاب پاسخ بهینه نهایی از میان پاسخ‌های بهینه پارتو به میزان آگاهی طراح از مسأله و شرایط مرزی آن بستگی دارد.



شکل ۲) جبهه پارتو، نمایش نقاط ایده‌آل و غیرایده‌آل در فضای هدف

جبهه پارتو اطلاعاتی درباره تعادل بین اهداف مسأله به دست می‌دهد. این تعادل بیانگر میزان حساسیت اهداف نسبت به یکدیگر بوده و توسط شکل جبهه پارتو قابل تشریح است. در حالت کلی، هر مسأله بهینه‌سازی چند هدفه با قیود مساوی و نامساوی را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد[۱۶].

$$\min \quad f_i(x) \quad , \quad i=1, \ldots, n \tag{۱۳}$$

$$subject\ to: \begin{cases} g_j(x)=0 & , \quad j=1, \ldots, r \\ h_k(x)\le 0 & , \quad k=1, \ldots, z \end{cases} \tag{۱۴}$$

که در آن، x برداری حاوی p متغیر تصمیم، n تعداد توابع هدف، r تعداد قیود مساوی و z تعداد قیود نامساوی می‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

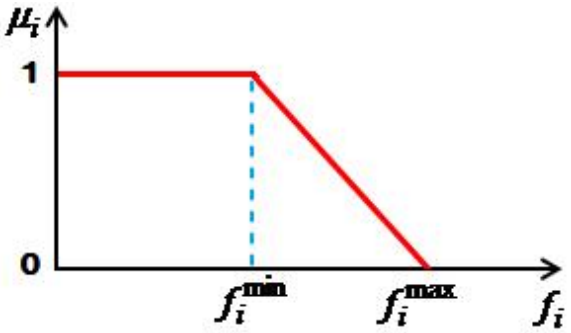
در یک مسأله بهینه‌سازی چند هدفه اگر x_1 و x_2 بردارهای تصمیم باشند می‌توان گفت بردار x_1 بردار x_2 را مغلوب می‌کند اگر و تنها اگر هر دو شرط زیر برقرار باشد:

$$x_1 < x_2 \Leftrightarrow \begin{cases} \forall\ i \in \{1,\dots,n\} \quad , \quad f_i(x_1) \le f_i(x_2) \\ \qquad\qquad \& \\ \exists\ i \in \{1,\dots,n\} \quad , \quad f_i(x_1) < f_i(x_2) \end{cases} \tag{۱۵}$$

در روش وزن‌دهی، ترجیحات تصمیم‌گیرنده یا همان اهمیت نسبی اهداف باید از قبل مشخص باشد. به عنوان مثال، در این روش برای تولید ۱۰۰ نقطه نامغلوب باید ۱۰۰ بار برنامه را با ضرایب وزنی مختلف اجرا کرد. با این حال، در یک شرایط پویا تعیین ضرایب وزنی اهداف کار راحتی نیست. این در حالی است که در روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی بر معیار پارتو در یک بار اجرای برنامه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های کارآمد تحت عنوان جبهه بهینه پارتو قابل ارائه است.

ترکیب منطق فازی با الگوریتم

در این مقاله، برای استخراج یک پاسخ بهینه از بین پاسخ‌های غیر مغلوب از نظریه مجموعه‌های فازی استفاده شده است. در این حالت، تابع تصمیم‌گیری فازی به صورت تابع عضویتی در نظر گرفته شده که بتوان مقدار دقیق متغیرها را در آن جایگزین کرد. مقدار این تابع عضویت فازی، میزان وفق پذیری شاخص اقتصادی را در این مسأله نشان می‌دهد. شکل (۳) تابع عضویت » را برای یک متغیر فازی نشان می‌دهد. این متغیر فازی بیان کننده مفهوم هزینه است و به صورت رابطه ۱۶ مدل می‌شود [۱۰].



شکل ۳) تابع عضویت فازی هزینه

$$«_i = \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \tag{۱۶}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

در رابطه فوق، $f_i^{\min}$ و $f_i^{\max}$ به ترتیب بیان کننده حداقل و حداکثر مقدار i^{th} هدف مسأله است. همچنین برای هر K پاسخ غیر مغلوب تابع عضویت نرمال شده به صورت رابطه (۱۸) قابل بیان است [۷].

$$FDM_i = \begin{cases} 0 & for \quad «_i \le 0 \\ «_i & for \quad 0 \le «_i \le 1 \\ 1 & for \quad «_i \ge 1 \end{cases} \tag{۱۷}$$

$$FDM^k = \frac{\sum_{i=1}^{2} FDM_i^k}{\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{2} FDM_i^j} \tag{۱۸}$$

در رابطه فوق، M تعداد کل راه حل‌های نامغلوب است. بهترین حالت برای حل مسأله مورد نظر در این مقاله، این است که در ابتدا حداکثر مقدار FDM^k را برای تصمیم گیری فازی در نظر بگیریم. سپس راه حل‌ها بر حسب مقدار به صورت نزولی مرتب می‌شوند و با توجه به مقدار تابع عضویت، تحت شرایط عملیاتی و بر طبق فهرست حق تقدم، بهترین راه‌حل از بین راه حل‌های غیر مغلوب انتخاب می‌شود.

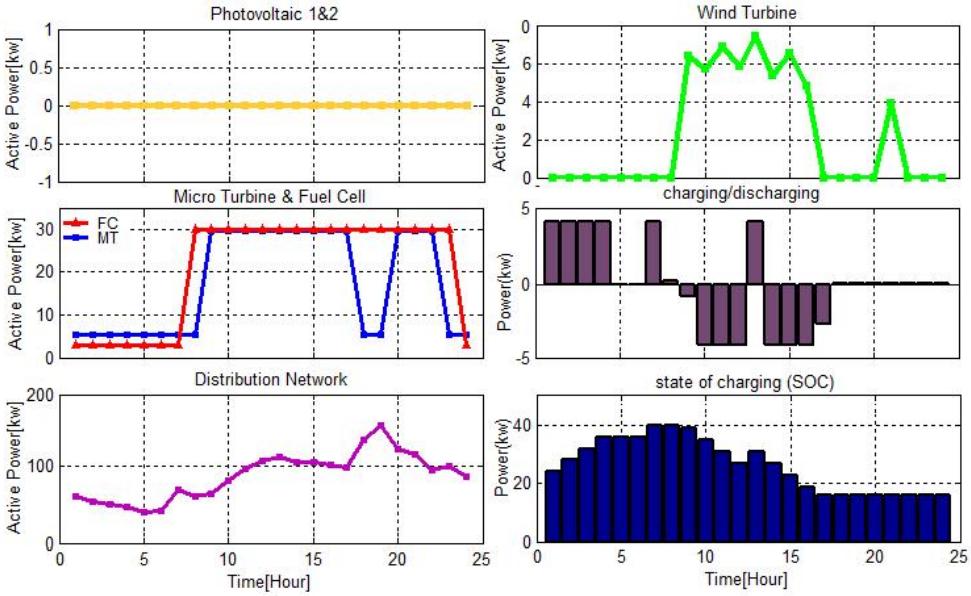
نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی

به منظور بررسی عملکرد واحد کنترل مرکزی و روش پیشنهادی برای مدیریت انرژی در ریزشبکه، ابتدا فرض بر این است که کل تقاضای بار توسط شبکه سراسری توزیع تأمین شده و هیچ منبع تولید پراکنده‌ای در تأمین نیاز بار مشارکت ندارد. در این حالت، هزینه تغذیه بار با توجه به پروفیل بار ارائه شده در شکل۱-ب معادل ۴۶۹/۷۶ € و میزان انشار آلودگی متناظر با آن ۲۶۵۰kg محاسبه شده است. در ادامه، با در نظر گرفتن حضور منابع تولید پراکنده و سیستم ذخیره‌ساز انرژی در ریزشبکه، به منظور کاهش آلودگی هوا و هزینه‌های بهره‌برداری، میزان تولید بهینه هریک از منابع تولید پراکنده و نحوه ذخیره‌ساز انرژی در قالب یک برنامه کاری بهینه برای سه سناریو مختلف بررسی و نتایج آن با حالت پایه مقایسه می‌گردد.

سناریو ۱) بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری

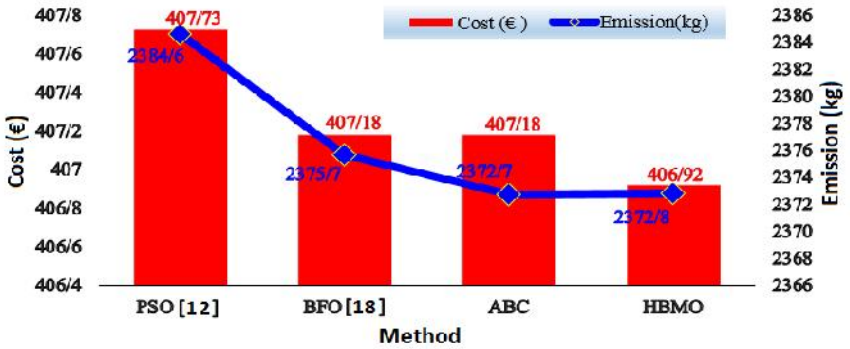
در این حالت، هدف مسأله این است که با ایجاد تعامل بین منابع تولید توان در سیستم، اقتصادی‌ترین حالت برای تأمین نیاز بار ارائه شود. از این‌رو، در این سناریو زمان شارژ و دشارژ باتری‌ها و میزان تولید هر یک از منابع با توجه به قیمت پیشنهادی بازار تعیین می‌شود. نتایج روش پیشنهادی برای این حالت شامل توان دریافتی از شبکه، وضعیت ذخیره‌سازی انرژی و برنامه تولید بهینه هر یک از منابع در شکل (۴) ارائه شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]



شکل ٤) بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری (میانگین نتایج در ۲۰ بار اجرای برنامه)

به منظور مشاهده عملکرد الگوریتم HBMO در بهینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری از ریزشبکه، نتایج این روش با چند روش پیشنهادی در مراجع مقایسه شده و در شکل (۵) ارائه شده است. نتایج حاصل از روش پیشنهادی کاهش ۱۳/۳۷درصدی هزینه و ۱۰/۴۶ درصدی آلودگی را برای این سناریو نسبت به حالت پایه نشان می‌دهد. انحراف معیار نتایج روش پیشنهادی برای ۲۰ بار اجرای برنامه در این سناریو ۰/۰۰۲۹ محاسبه شده است.

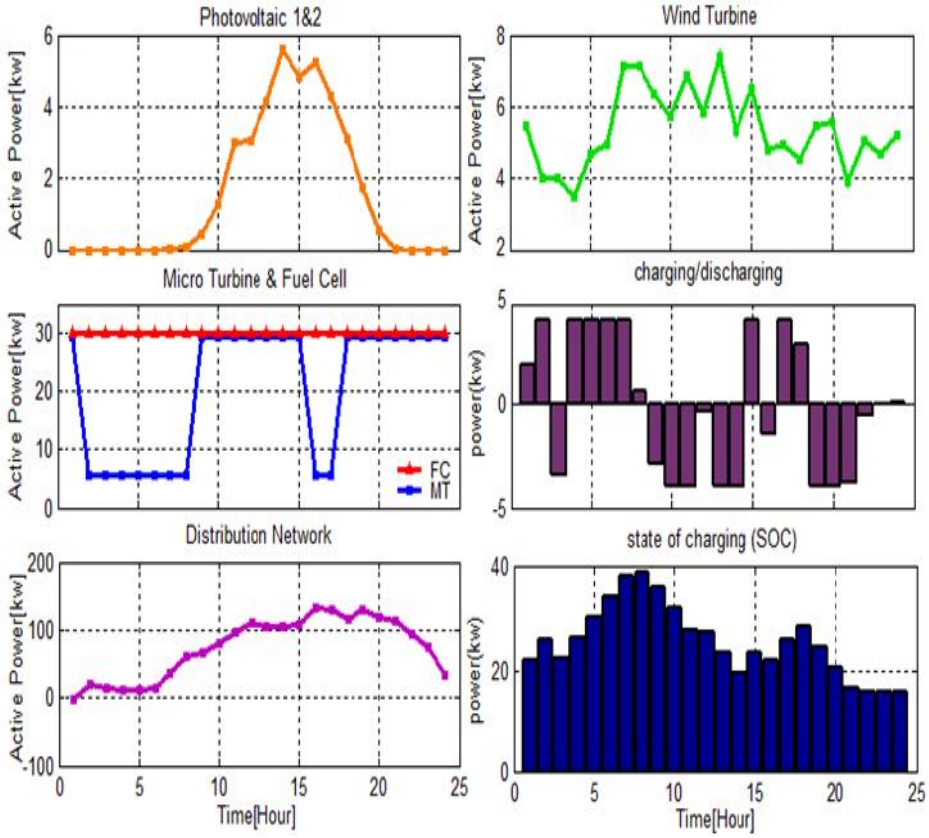


شکل ۵) مقایسه نتایج روش پیشنهادی در بهینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری از ریزشبکه (میانگین نتایج در ۲۰ بار اجرای برنامه)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

سناریو ۲) بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه با هدف کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی

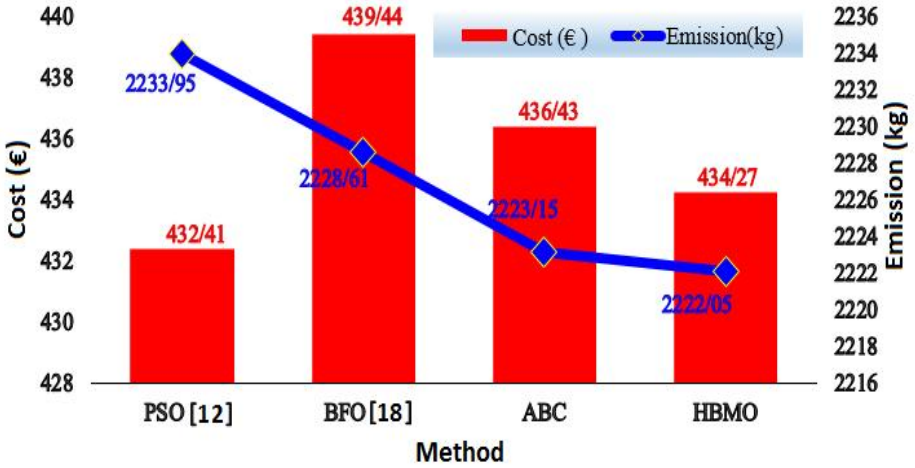
در این حالت، با صرف نظر از هزینه‌های تولید توان سعی بر این است که تقاضای بار توسط انرژی‌های پاک‌تر تأمین شود. از این‌رو، در این سناریو میزان مشارکت منابع در تغذیه بار و برنامه شارژ و دشارژ باتری‌ها با هدف کاهش گازهای آلاینده محیط زیست تعیین می‌شود. نتایج این حالت شامل تولید بهینه هر یک از منابع تولید پراکنده، وضعیت ذخیره‌سازی انرژی و توان دریافتی از شبکه توزیع در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل ٦) بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه با هدف کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی (میانگین نتایج در ۲۰ بار اجرای برنامه)

به منظور مشاهده عملکرد الگوریتم HBMO در بهینه‌سازی میزان آلاینده‌های زیست محیطی، نتایج این روش با چند روش پیشنهادی در مراجع مقایسه شده و در شکل (۷) ارائه شده است. نتایج حاصل از روش پیشنهادی کاهش ۷/۵۶ درصدی هزینه و کاهش ۱۶/۱۵ درصدی آلودگی را برای این سناریو نسبت به حالت پایه نشان می‌دهد. انحراف معیار نتایج روش پیشنهادی برای ۲۰ بار اجرای برنامه در این سناریو ۰/۰۰۳۷ محاسبه شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]



شکل ۷) مقایسه نتایج روش پیشنهادی در بهینه‌سازی آلودگی‌های زیست محیطی (میانگین نتایج در ۲۰ بار اجرای برنامه)

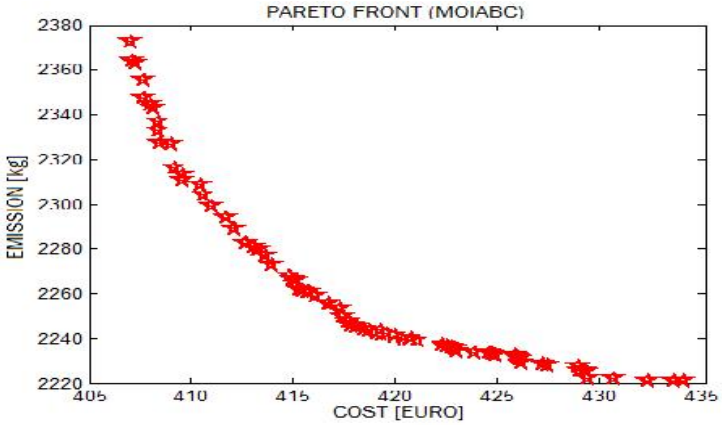
سناریو ۳) بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه با هدف کاهش همزمان هزینه‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی

در این حالت، هدف کمینه‌سازی همزمان هزینه‌های بهره‌برداری و میزان آلودگی می‌باشد. از این‌رو، از روش بهینه سازی چندهدفه HBMO بهبود یافته مبتنی بر معیار پارتو در بهینه‌سازی همزمان اهداف مسأله استفاده شده است. همچنین برای تعیین یک جواب بهینه از بین مجموعه جواب‌هاب بهینه پارتو از یک شاخص فازی مطابق با مطالب بیان شده در بخش فازی سازی الگوریتم استفاده شده است. جبهه بهینه پارتو بدست آمده برای این حالت با ۶۹ پاسخ غیر مغلوب در شکل (۸) ارائه شده است. این مجموعه پاسخ‌های بهینه، حداقل هزینه €۴۰۶/۹۹ و حداقل آلودگی kg ۲۲۲۲/۴۷ را نشان می‌دهد. در این حالت، معیار فازی اختیار شده به عنوان یک شاخص اقتصادی، باعث می‌شود که با توجه به نحوه تعامل بین اهداف مسأله، یک پاسخ از میان مجموعه پاسخ‌های بهینه پارتو (۶۹ پاسخ غیرمغلوب) به عنوان بهترین جواب مسأله انتخاب شود. در این حالت، میزان تولید بهینه هریک از منابع ، وضعیت ذخیره‌سازی انرژی در ریزشبکه و میزان توان مبادله شده با شبکه سراسری در جدول (۲) ارائه شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

جدول۲) میزان مشارکت واحدهای تولید پراکنده در تأمین نیاز بارمحلی

1	0	6	5.46	30	19.98	26.54
2	0	6	4.005	30	23.96	23.995
3	0	6	4.005	30	27.936	14.995
4	0	6	3.51	30	31.908	16.49
5	0	6	4.68	30	35.876	12.32
6	0	6	4.9350	30	39.84	14.065
7	0	6	7.14	30	40	32.86
8	0	6	7.155	30	40	56.845
9	0.455	30	6.36	30	35.96	67.185
10	1.3	30	5.715	30	31.924	78.985
11	2.99	30	6.885	30	27.892	104.125
12	3.029	30	5.85	30	23.864	107.121
13	4.134	30	7.41	30	19.84	104.456
14	5.629	30	5.325	30	16	105.046
15	4.81	30	6.495	30	16	104.695
16	5.239	30	4.815	30	16	108.946
17	0	6	4.935	30	16	129.065
18	0	30	4.545	30	16	119.455
19	1.729	30	5.46	30	16	128.811
20	0.559	30	5.595	30	16	119.846
21	0	30	3.9	30	16	112.6312
22	0	30	5.07	30	16	94.946
23	0	30	4.68	30	16	75.336
24	0	6	5.19	30	16	58.826



شکل ۸) مجموعه پاسخ‌های بهینه پارتو

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

در بهینه‌سازی همزمان هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی‌های زیست محیطی ، از بین مجموعه پاسخ‌های بهینه پارتو و با توجه به نحوه تعامل بین اهداف، مقدار هزینه €۴۲۴/۳۵۷ و میزان آلودگی kg ۲۲۳۲/۳۱۷ به عنوان بهترین جواب برای سناریو سوم تعیین شده است. نتایج بهینه‌سازی همزمان اهداف در این سناریو کاهش ۹/۶۷ درصدی هزینه و کاهش ۱۵/۷۶ درصدی آلودگی را نسبت به نتایج حالت پایه نشان می‌دهد.

نتیجه گیری

در این مقاله، پس از معرفی سیستم مورد مطالعه ومدل‌سازی تابع هدف، بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه در سه سناریو مورد بررسی قرار گرفت و نتایج هر حالت ارائه شد. همچنین در این بررسی، نوسانات بازار برق و محدودیت‌هایی در رابطه با انتشار گازهای آلاینده در مدیریت انرژی منابع تولید پراکنده و نحوه ذخیره‌سازی انرژی در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از مدیریت بهینه انرژی در ریزشبکه شامل نحوه مشارکت منابع تولید پراکنده در تأمین تقاضای بار، برنامه زمانی شارژ و دشارژ باتری‌ها و انرژی دریافتی از شبکه توزیع در هر سناریو با توجه به اهداف و محدودیت‌های مورد نظر تعیین و نتایج عددی هر حالت با سایر روش‌ها مقایسه شد. در سناریوی سوم با توجه به اینکه از معیار پارتو در بهینه‌سازی همزمان اهداف استفاده شده است، مسأله دارای یک مجموعه جواب بهینه است که هیچیک از این جواب‌ها بر دیگری ارجعیت ندارد. در ادامه، با اختصاص یک تابع فازی به یکی از اهداف مسأله (هزینه) بهترین جواب برای داشتن هزینه‌ای کمتر از €۴۳۰ تعیین گردید. در این حالت، میزان مشارکت هر یک از منابع تأمین کننده نیاز بار و وضعیت ذخیره‌سازی انرژی در ریزشبکه متناظر با بهترین جواب حاصل از بهینه‌سازی همزمان اهداف، کاهش قابل ملاحظه‌ای را در هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار گازهای آلاینده نشان داده است. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با سایر روش‌ها عملکرد مناسب الگوریتم HBMO را در بهینه‌سازی اهداف مسأله نشان می‌دهد. همچنین انحراف معیار نتایج روش HBMO دقت این روش را برای حل مسأله مدیریت بهینه انرژی در ریزشبکه و همچنین بهینه‌سازی دیگر مسائل سیستم قدرت تأیید می‌کند.

منابع

[1] A. M. Faisal, N. K. Heikki, “System modeling and online optimal management of Microgrids using Mesh Adaptive Direct Search,” *Elsevier, Electrical power and energy systems*, pp. 398-407, 2010.

[2] E. Sortomme, M.A. El.Sharkawi,“optimal power flow for a system of microgrids with controllable loads and battery storage,” *Power Systems Conference and Exposition, IEEE/PES*, pp. 1-5, 2009.

[3] Faisal A. Mohamed, Heikki, Koivo, “System Modeling and Online Optimal Management of Microgrid Using Mesh Adaptive Direct Search,”*International Journal of Electrical Power & Energy System*, vol. 32, no. 5, pp. 398-407, 2010.

[4] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, “Microgrids management,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 54 –65, may-june 2008.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

[5] G. Tsikalakis, D. Nikos, N. D. Hatziargyriou, “Centralized Control for Optimization Microgrids Operation,” *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 241-247, March. 2008.

[6] H.A. Shayanfar, G. Derakhshan, A. Ameli, “Optimal operation of Microgrids using renewable energy resources,” *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering* , Vol. 4, no. 1, pp. 97-102, March 2012.

[7] A. Ghasemi,” A Fuzzified Multi Objective Interactive Honey Bee Mating Optimization for Environmental/Economic Power Dispatch with valve point effect,” Electrical Power and Energy Systems, vol. 49. pp. 308-321, July 2013.

[8] IEEE Standard 1547.4-2011, “IEEE Guide for Design Operation, and Integration of Distributed ResourceIsland Systems with Electric Power Systems”, 2011.

[9] K. Ranjbar, M. Moradi , S. M. Barakati, “Effects of Time-Of-Use Demand Response Programs Based on Optimal Operation of a MicroGrid in Market Environment,”*International Journal of academic and industrial research*, Vol. 2, no. 5, pp. 1-12, 2013.

[10] L.H. Wua, Y.N. Wanga, X.F. Yuan, S.W. Zhou," Environmental/economic power dispatch problem using multi objective differential evolution algorithm", *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 1171–1181, 2010.

[11] M. Hajibabaee, M. Haghshenas, M. Ebadian, “Optimal Management of The MicroGrid Operation in order to Reduce Environmental Pollution Based on ISFLA Method,” *3rd International Conference on Environmental Planning & Management*, pp. 1-9, October 2013.

[12] N. Bazmohammadi, A. Karimpour, S. Bazmohammadi, “Optimal_operation_management_of_a microgrid_based_on_MOPSO_and_Differential_Evolution_algorithms,” *2nd Iranian Conference on Smart Grids (ICSG)*, 2012

[13] N. D. Hatziargyriou, A. G. Anastasiadis, J. Vasiljevska, A. G. Tsikalakis, “Quantification of Economic, Environmental and Operational Benefits of Microgrids,” *presented at IEEE Bucharest Power Tech. Conf.* Bucharest, Romania, 2009.

[14] O. Bozorg Haddad, A. Afshar, M.A. Marino, B.J. Adams, “Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation,” *Journal of the Franklin Institute* Vol. 344, no. 5, PP 452–462, August 2007.

[15] R. Belfkira, G. T. Baraket, C. Ichita,“Design study and optimization of a grid independent wind/pv/Diesel system,” *IEEE European conference on Power Electronics and App*, 2009.

[16] . Agrawal, Y. Dashora, M. K. Tiwari, Y. J. Son, “Interactive Particle Swarm: A Pareto-Adaptive Metaheuristic to Multiobjective Optimization,” *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, vol. 38, no. 2, pp. 258–277, March. 2008.

[17] S. Chakraborty, M. D. Weiss, M.G. Simoes, “Distributed intelligent energy management system for a single-phase high frequency AC microgrid,” *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, vol. 54, no. 1, pp. 97–109, 2007.

[18] S. M. Tabatabaei, B. Vahidi, “Optimum Management of hybrid Distributed Generations in Microgrid using bacterial foraging solution,” *Science International Journal* , Vol. 25, no. 3, pp. 487-496, 2013.

[19] Y. Bao, X. Chen, H. Wang, B. Wang, “Genetic Algorithm Based Optimal Capacity Allocation for an Independent Wind/PV/Diesel/ Battery Power Generation System,” *Journal of Information & Computational Science*, vol. 10, no. 14, pp. 4581-4592, 2013.

[20] Y. Levron, J. M. Guerrero, Y. Beck, “Optimal Power Flow in Microgrids With Energy Storage,” *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 28, no. 3,pp. 3226-3234, August 2013.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]