

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

مرتضی حق‌شناس<sup>۱</sup>، محمد حاجی‌بابایی<sup>۲</sup>، محمود عبادیان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله:

۹۳/۹/۹

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۳/۱۲/۳

## چکیده:

در این مقاله، منظور از مدیریت اقتصادی زیست‌محیطی انرژی در یک ریزشکه (میکرو شبکه) تعیین میزان مشارکت هر یک از منابع تولید پراکنده در تأمین تقاضای بار محلی با هدف کاهش همزمان هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی‌های زیست‌محیطی است. ظرفیت واحدهای نصب شده در ریزشکه مورد مطالعه در این مقاله به گونه‌ای است که همواره بخشی از انرژی مورد تقاضای بار توسط شبکه سراسری تأمین می‌گردد. از این رو، با توجه به اهداف مورد نظر در بهینه‌سازی عملکرد ریزشکه، برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی با توجه به نحوه تعامل ریزشکه 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 بهینه‌سازی 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 ریزشکه، منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازی انرژی، بهینه‌سازی چند هدفه

Haghshenas.M@birjand.ac.ir  
 Mohammad.Hajibabae@birjand.ac.ir  
 Mahmoud\_Ebadian@yahoo.com

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت دانشگاه بیرجند (نویسنده مسئول)  
 (۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت دانشگاه بیرجند  
 (۳) دانشیار گروه قدرت دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند

## مقدمه

امروزه با توجه به بحران های زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت های فسیلی، علاوه بر کاهش هزینه بهره برداری از نیروگاه ها، کمینه سازی میزان آلودگی متناظر با انرژی تولید شده نیز از اهمیت ویژه ای برخوردار است. از این رو، در چند دهه اخیر بکارگیری واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر انرژی های تجدید پذیر به منظور کاهش آلودگی های زیست محیطی متناظر با تولید انرژی الکتریکی رایج شده است. در پی گسترش استفاده از تولیدات پراکنده در سیستم قدرت، استفاده از ریزشبه ها مورد توجه ویژه ای قرار گرفته است. ریز شبکه یک شبکه محلی شامل واحدهای تولید پراکنده، سیستم های ذخیره ساز انرژی و بارهای کنترل پذیر است که می تواند در دو حالت متصل به شبکه سراسری یا مستقل از آن (جزیره ای) مورد بهره برداری قرار گیرد [۸]. استفاده بهینه از ریزشبه ها موجب بی نیازی از احداث شبکه های انتقال جدید، کاهش آلودگی محیط زیست، کاهش تلفات انرژی در شبکه، افزایش کیفیت توان و نیز ایجاد راهکارهای مناسب جهت استفاده از منابع تجدید پذیر انرژی می شود [۴ و ۱۸]. هر ریزشبه دارای یک واحد مدیریت مرکزی است که در آن با پیشگرمی وضعیت بارها و تولید منابع، تصمیمات لازم در راستای بهینه سازی عملکرد آن با توجه به اهداف و محدودیت های تعیین شده اتخاذ می شود [۶]. در این راستا، اثرات استفاده از یک کنترل کننده مرکزی در ریزشبه برای دستیابی به یک برنامه هماهنگ در [۱۳] بررسی شده است. مولفین در [۵] نقش مرکز مدیریت را با هدف بهره برداری بهینه و مدیریت تولیدات پراکنده بررسی کرده اند و تبادل انرژی با شبکه بالادست را نیز در نظر گرفته اند. بهینه سازی هزینه های بهره برداری از ریزشبه با در نظر گرفتن اثر سیستم های ذخیره ساز انرژی هدفی است که در مرجع [۲] با روش تجمع ذرات و در [۱۷] با روش برنامه ریزی خطی دنبال شده است. در مرجع [۹] مدیریت ریزشبه با در نظر گرفتن نوسانات بازار برق بررسی شده است. مراجع [۱۲ و ۱] بهینه سازی هزینه ها را با در نظر گرفتن اثر آلودگی های زیست محیطی انجام داده اند. در مرجع [۱۱] مدیریت تولید ریزشبه با استفاده از یک روش بهینه سازی تک هدفه برای دو سناریو کاملاً مستقل به منظور بهینه سازی هزینه های بهره برداری و کاهش آلودگی های زیست محیطی انجام گرفته است.

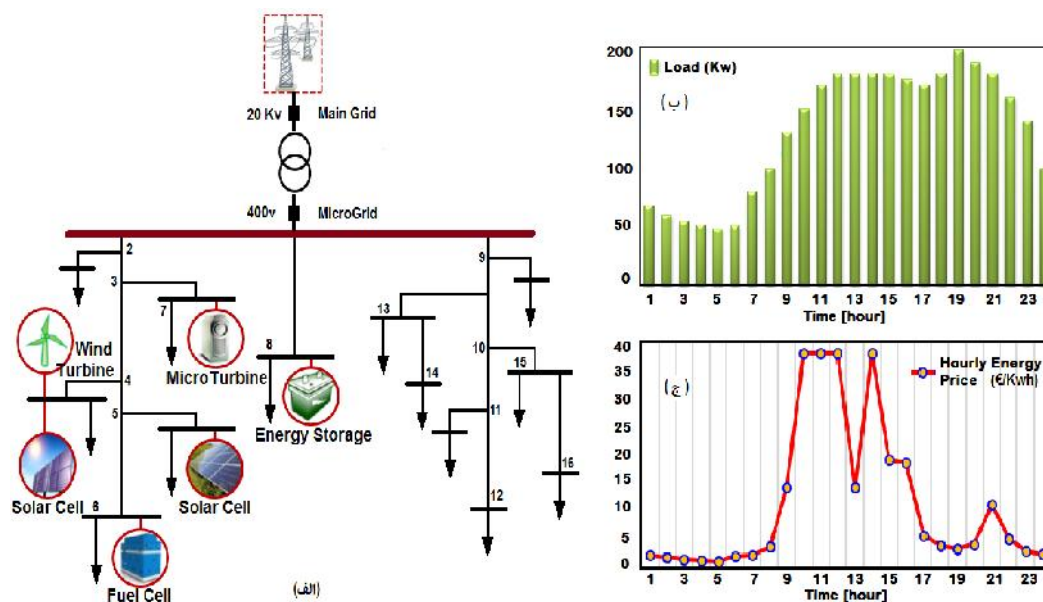
در این مقاله، مسأله مدیریت اقتصادی-زیست محیطی انرژی در یک ریزشبه برای عملکرد در حالت متصل به شبکه سراسری به منظور بهینه سازی همزمان هزینه های بهره برداری و کاهش آلودگی های زیست محیطی با در نظر گرفتن نوسانات قیمت بازار برق برای یک بازه زمانی مشخص توسط روش چند هدفه <sup>۱</sup> HBMO مبتنی بر معیار پارتو و منطق فازی حل شده و نتایج حاصل از روش پیشنهادی با سایر روش ها مقایسه می گردد.

سیستم مورد مطالعه

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

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

Type	$P_{min}$ (kw)	$P_{max}$ (kw)	$b_i$ (€/kwh)	$C_i$ (€/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 ریزشبهه مورد مطالعه [۵] ب) پروفیل بار ریزشبهه در ۲۴ ساعت

ج) قیمت پیشنهادی بازار برای ۲۴ ساعت

## 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].

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

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  $i$  ام و  $P_G(t)$  توان اکتیو دریافتی از شبکه توزیع در ساعت  $t$  ام می‌باشد. همچنین  $B_G(t)$  قیمت ساعتی انرژی شبکه و  $B_i(P_{g_i}(t))$  قیمت پیشنهادی  $i$  امین واحد تولید پراکنده برای تولید  $P_{g_i}$  کیلووات توان در ساعت  $t$  ام از دوره مورد مطالعه است و به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۲].

$$B_i(P_{g_i}(t)) = b_i \cdot P_{g_i}(t) + c_i \quad (2)$$

که در آن،  $b_i$  و  $c_i$  ضرایب تابع هزینه برای واحد  $i$  ام 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.

$$E(P) = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{k=1}^M \left\{ \sum_{i=1}^N P_{g_i}(t) \cdot EF_{i,k} + P_G(t) \cdot EF_{G,k}(t) \right\} \right\} \quad (3)$$

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

## 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 محدوده مجاز تولید آن واحد باشد. این محدودیت باتوجه به مسائل فنی و شرایط اقتصادی حاکم بر سیستم به صورت زیر بیان می‌شود [۱۸].

$$P_{g_i}^{\min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{\max} \quad (۴)$$

### 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 شود. این امر به صورت یک محدودیت مطابق با رابطه زیر در نظر گرفته شده است.

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

که در آن،  $P_{load}(t)$  توان مورد تقاضای بار و  $P_B(t)$  توان سیستم ذخیره‌ساز انرژی است که با توجه به وضعیت شارژ یا 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 باتری‌ها نباید از حد مشخصی کمتر شود. از این‌رو، وضعیت شارژ باتری‌ها (SOC) را در هر زمان می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۱۹ و ۱۵]. در این زمینه، مدل‌های متفاوت دیگری نیز در [۲۰ و ۱۲] ارائه شده است.

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-u(t)) + y_{charge} \cdot \max(0, P_B(t)) \cdot \Delta t + \frac{1}{y_{discharge}} \min(0, P_B(t)) \cdot \Delta t \quad (۶)$$

در رابطه فوق،  $y_{bat}$  بیانگر راندمان شارژ باتری‌ها،  $u$  ضریب دشارژ خودی سیستم ذخیره‌ساز است و به پارامترهای باتری‌ها وابسته است.  $\Delta t$  طول یک بازه زمانی می‌باشد که در این مقاله، یک ساعت در نظر گرفته شده است. در این حالت، محدودیت شارژ باتری‌ها به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۹ و ۳].

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (۷)$$

### الگوریتم بهینه‌یابی جفت‌گیری 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 تخم‌گذاری 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.

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

که در آن،  $prob(Q, D)$  احتمال یک جفت‌گیری موفق بین زنبور نر  $D$  ام 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:

$$S(t+1) = r \times S(t) \quad (۹)$$

$$E(t+1) = E(t) - x \quad (۱۰)$$

که در آن،  $r$  و  $x$  ضرایبی بین  $[0, 1]$  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:

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

که در آن،  $S$  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، به طور تصادفی بچه تولید می‌شود در حالی که یک عدد ثابت است.

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

### ۴. مرتب کردن جمعیت جدید و به‌گزینی ملکه

در این مرحله، بعد از مرتب کردن بچه زنبورها، بچه زنبور برتر با ملکه موجود مقایسه می‌شود و به شرط داشتن میزان برازندگی بهتر جایگزین ملکه می‌شود. در غیر این صورت، پرواز جفت‌گیری بعدی توسط ملکه موجود انجام می‌گیرد.

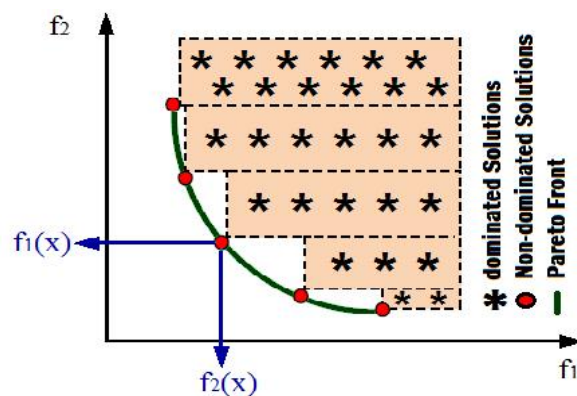
### ۵. بررسی شرط خاتمه

پس از محقق شدن شرط خاتمه، ملکه به عنوان جواب نهایی مسأله انتخاب می‌شود. در غیر این صورت، نسل جدیدی 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 یک از اهداف، مسأله چند

هدفه را به صورت یک ترکیب خطی وزن دار 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 به صورت زیر بیان کرد [۱۶].

$$\min f_i(x) \quad , \quad i = 1, \dots, n \quad (13)$$

$$\text{subject to: } \begin{cases} g_j(x) = 0 & , \quad j = 1, \dots, r \\ h_k(x) \leq 0 & , \quad k = 1, \dots, z \end{cases} \quad (14)$$

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

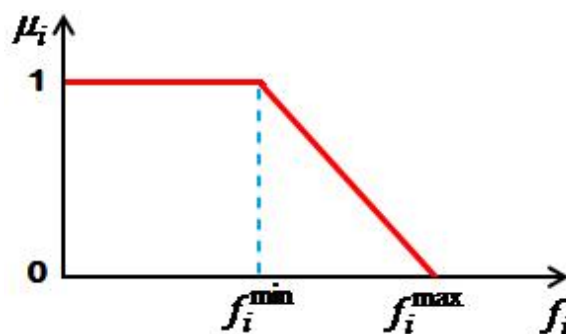
در یک مسأله بهینه‌سازی چند هدفه اگر  $x_1$  و  $x_2$  بردارهای تصمیم باشند می‌توان گفت بردار  $x_1$  بردار  $x_2$  را مغلوب می‌کند اگر و تنها اگر هر دو شرط زیر برقرار باشد:

$$x_1 < x_2 \Leftrightarrow \begin{cases} \forall i \in \{1, \dots, n\} & , f_i(x_1) \leq f_i(x_2) \\ & \& \\ \exists i \in \{1, \dots, n\} & , f_i(x_1) < f_i(x_2) \end{cases} \quad (15)$$

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 وفق‌پذیری شاخص اقتصادی را در این مسأله نشان می‌دهد. شکل (۳) تابع عضویت  $\sim_i$  را برای یک متغیر فازی نشان می‌دهد. این متغیر فازی بیان‌کننده مفهوم هزینه است و به صورت رابطه ۱۶ مدل می‌شود [۱۰].



شکل (۳) تابع عضویت فازی هزینه

$$\sim_i = \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (16)$$

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

$$FDM_i = \begin{cases} 0 & \text{for } \sim_i \leq 0 \\ \sim_i & \text{for } 0 \leq \sim_i \leq 1 \\ 1 & \text{for } \sim_i \geq 1 \end{cases} \quad (17)$$

$$FDM^k = \frac{\sum_{i=1}^2 FDM_i^k}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^2 FDM_i^j} \quad (18)$$

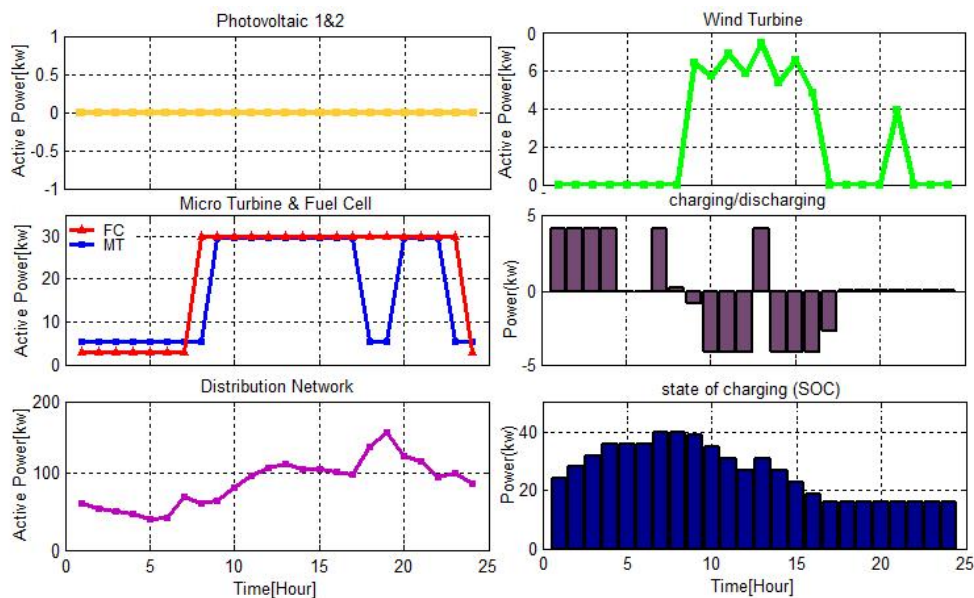
در رابطه فوق،  $M$  تعداد کل راه حل‌های نامغلوب است. بهترین حالت برای حل مسأله مورد نظر در این مقاله، این است که در ابتدا حداکثر مقدار  $FDM^k$  را برای تصمیم‌گیری فازی در نظر بگیریم. سپس راه حل‌ها بر حسب مقدار به صورت نزولی مرتب می‌شوند و با توجه به مقدار تابع عضویت، تحت شرایط عملیاتی و بر طبق فهرست حق تقدم، بهترین راه حل 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 شکل ۱-ب معادل € ۴۶۹/۷۶ و میزان انتشار آلودگی متناظر با آن ۲۶۵۰ kg 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 هر یک 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.

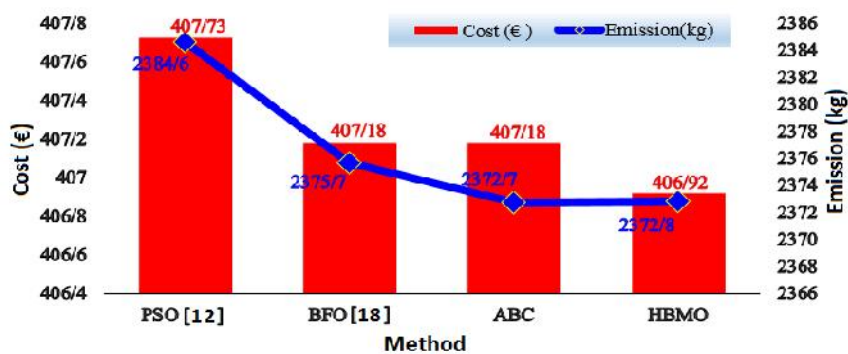
#### سناریو ۱) بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری

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 دریافتی از شبکه، وضعیت ذخیره‌سازی انرژی و برنامه تولید بهینه هر یک از منابع در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل ۴) بهینه‌سازی عملکرد ریزشبه با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری (میانگین نتایج در ۲۰ بار اجرای برنامه)

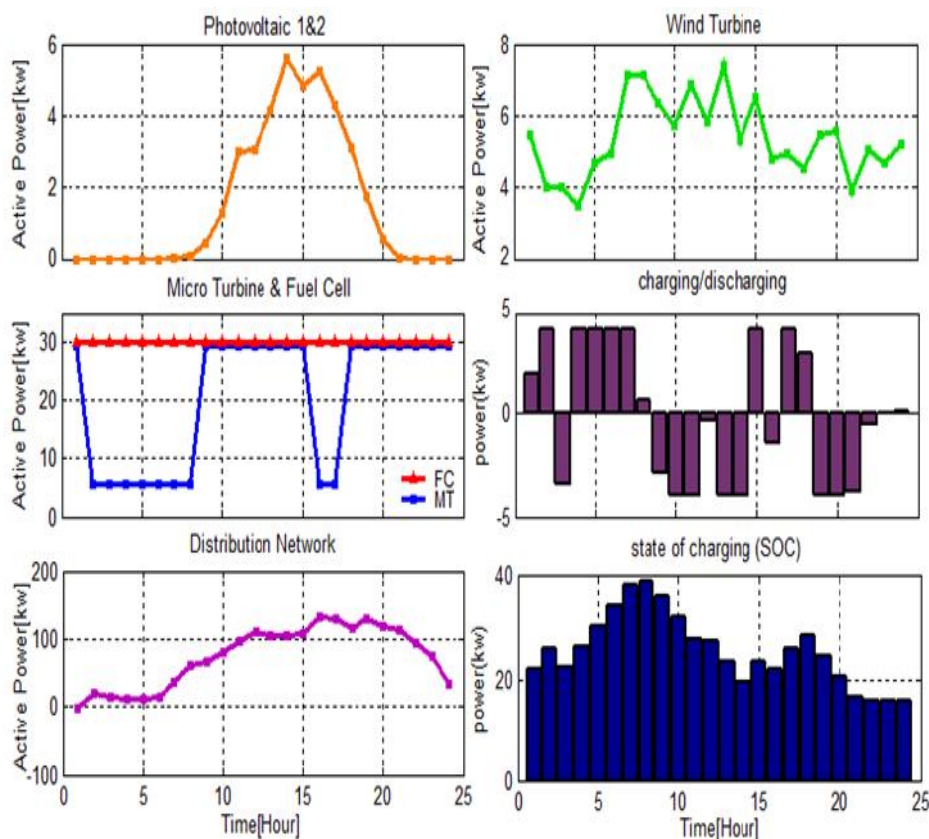
به منظور مشاهده عملکرد الگوریتم HBMO در بهینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری از ریزشبه، نتایج این روش با چند روش پیشنهادی در مراجع مقایسه شده و در شکل (۵) ارائه شده است. نتایج حاصل از روش پیشنهادی کاهش ۱۳/۳۷ درصدی هزینه و ۱۰/۴۶ درصدی آلودگی را برای این سناریو نسبت به حالت پایه نشان می‌دهد. انحراف معیار نتایج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



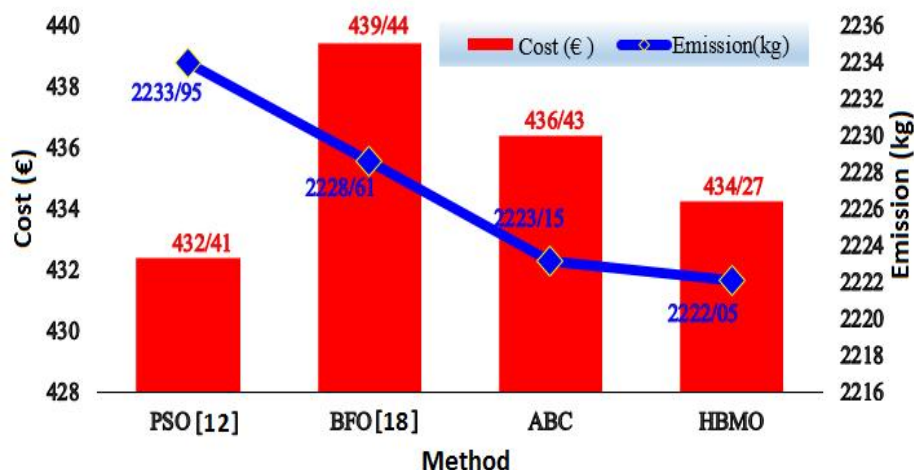
شکل ۵) مقایسه نتایج روش پیشنهادی در بهینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری از ریزشبه (میانگین نتایج در ۲۰ بار اجرای برنامه)

### سناریو ۲) بهینه‌سازی عملکرد ریزشبكة 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. در 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 ۶) بهینه‌سازی عملکرد ریزشبكة با هدف کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی (میانگین نتایج در ۲۰ بار اجرای برنامه) به منظور مشاهده عملکرد الگوریتم HBMO در بهینه‌سازی میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی، 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.



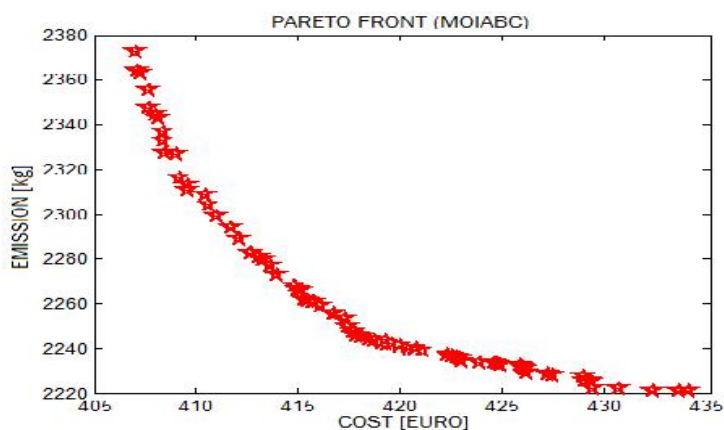
شکل ۷) مقایسه نتایج روش پیشنهادی در بهینه‌سازی آلودگی‌های زیست محیطی (میانگین نتایج در ۲۰ بار اجرای برنامه)

### 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 بهینه‌سازی 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 جواب‌ها، 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  $406/99€$  و حداقل آلودگی  $2222/47 kg$  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.

جدول ۲) میزان مشارکت واحدهای تولید پراکنده در تأمین نیاز بارمحل

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

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.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، پس از معرفی سیستم مورد مطالعه و مدل‌سازی 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 ارجحیت 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. Hatziaargyriou, and A. Dimeas, "Microgrids management," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 54-65, may-june 2008.

- [5] G. Tsikalakis, D. Nikos, N. D. Hatziaargyriou, "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 Resource Island 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. Hajibabae, M. Haghshenas, M. Ebadian, "Optimal Management of The MicroGrid Operation in order to Reduce Environmental Pollution Based on ISFLA Method," *3<sup>rd</sup> 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. Hatziaargyriou, 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.