

# مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه نیروگاه بادی مبتنی بر DFIG، پیل سوختی و نیروگاه خورشیدی با استفاده از ترکیب منطق فازی و الگوریتم اجتماع ذرات

Milad Kefayat<sup>\*</sup>, Afshin Lenjkar Arā<sup>۲</sup>, Sید علی نبی نیاکی<sup>۳</sup>

۱- گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران، Milad.kefayat@gmail.com

۲- گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران، Lashkarara@iust.ac.ir

۳- گروه برق و کامپیوتر، دانشگاه تورنتو، تورنتو، کانادا، Nabavi.niaki@utoronto.ca

**چکیده:** انرژی‌های تجدیدپذیر به دلایل مسایل اقتصادی، زیستمحیطی و تقاضای رو به افزایش مصرف انرژی روز به روز در حال گسترش می‌باشند. به دلیل قابلیت قرارگیری غیر مرکز این تولیدات، جایابی و مقداریابی آن‌ها یکی از مسایل مهم بهره‌برداران سیستم می‌باشد. در این مقاله یک روش ترکیبی از منطق فازی و الگوریتم ازدحام ذرات برای پیدا کردن مکان و مقداریابی انواع تولیدات پراکنده شامل نیروگاه بادی مبتنی بر DFIG، سلول سوختی و انرژی خورشیدی ارایه گردیده است. هدف از بهینه‌سازی به حداقل رساندن هزینه تولیدات پراکنده، تلفات اکتیو و راکیتو با در نظر گرفتن محدودیت‌های امنیتی شبکه می‌باشد. از الگوریتم ازدحام ذرات به منظور تعیین مکان و ظرفیت تولیدات پراکنده استفاده شده است. در این مقاله ابتدا به بررسی عوامل بهینه‌سازی به صورت مجزا پرداخته شده، سپس با استفاده از منطق فازی تأثیر عوامل به صورت هم زمان و با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این مقاله نرم‌افزارهای MatLab و DiGILENT به صورت پیوسته دارای ارتباط اطلاعاتی دوطرفه می‌باشند، استفاده بعمل آمده است. مطالعات انجام شده بر روی شبکه نمونه IEEE ۳۳ شینه صورت گرفته است. نتایج حاصل نشان دهنده بهبود عملکرد سیستم قدرت و کارآیی الگوریتم پیشنهادی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی تجدیدپذیر، جایابی و مقداریابی بهینه، الگوریتم ازدحام ذرات، دیگسایلنت، منطق فازی.

سلول‌های سوختی، باد و ... می‌دهند<sup>[۱]</sup>. از دلایل توجه به این منابع می‌توان به کاهش تلفات سیستم، آلودگی‌های زیستمحیطی، نزدیکی به مصرف کننده، قابلیت نصب در مکان‌های کوچک و ...<sup>[۲]</sup> اشاره کرد. این عوامل باعث گردیده روز به روز ظرفیت بیشتری از تولیدات پراکنده به شبکه سراسری در مناطق مختلف جهان اضافه گردد<sup>[۳]</sup>.

استفاده کلارامدتر از منابع تولید پراکنده به منظور بهبود سیستم قدرت تا حد زیادی به عواملی مانند اندازه و محل این ادوات وابسته

## ۱- مقدمه

نیاز به منابع انرژی همواره از مسایل اساسی و مهم در زندگی بشر به دلیل رشد و پویایی روزافزون بوده است. از طرفی تلاش برای دست یابی به یک منبع بی‌انتها همواره مورد نظر می‌باشد. در سال‌های اخیر استفاده از منابع تولید پراکنده بسیار اهمیت یافته است. فناوری‌هایی تجدید ناپذیر مانند توربین‌های احتراقی و سیکل‌های ترکیبی رفته جای خود را به منابع تجدید پذیر مانند

سیستم‌های قدرت استفاده می‌کنند. به منظور بهره‌گیری از امکانات مدل‌سازی پیشرفته شبکه قدرت در نرم‌افزار DIGSILENT از یک برنامه واسط ارتباطی جهت تبادل اطلاعات بین دو نرم‌افزار DIGSILENT و MatLab بهره‌گیری شده است. نتایج شبیه‌سازی MatLab شده از طریق فضای داده مشترک اطلاعاتی به نرم‌افزار MatLab انتقال یافته سپس با استفاده از امکانات برنامه‌نویسی و حلقه‌های کنترلی نوشته شده در محیط برنامه‌نویسی MatLab امکان تجزیه و تحلیل داده‌های ورودی میسر گردیده است.

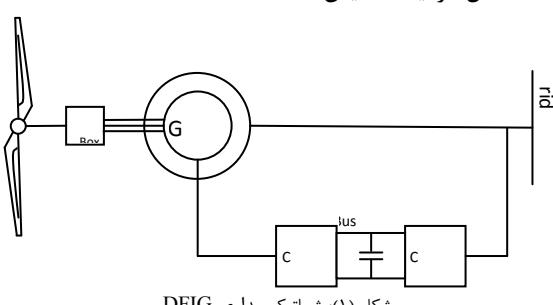
این مقاله شامل بررسی مدل‌سازی تولیدات پراکنده، تابع هزینه شبکه، بررسی الگوریتم ازدحام ذرات و منطق فازی می‌باشد. روش پیشنهادی بر روی شبکه نمونه طراحی شده پیاده‌سازی و در نهایتاً نتایج شبیه‌سازی مورد نتیجه‌گیری قرار گرفته است.

## ۲- مدل‌سازی تولیدات پراکنده

اتصال تولیدات پراکنده به مکان‌هایی نزدیک به مشترکان، می‌تواند قابلیت سیستم قدرت را افزایش دهد. وضعیت کنترل تولیدات پراکنده به طور کلی می‌توان در یکی از دو حالت PV یا PQ مورد بهره‌برداری قرار گیرد. تولیدات پراکنده در حالت بهره‌برداری به صورت PV قادر به تولید توان راکتیو برای کنترل ولتاژ می‌باشد. در این مقاله تولیدات پراکنده به عنوان شین Q در نظر گرفته شده است [۱۵].

### ۲-۱- مدل‌سازی DFIG

نیروگاه‌های بادی که ژنراتورهای آن‌ها هم از طریق استاتور و رotor به شبکه متصل هستند، DFIG نامیده می‌شوند. این دستگاه از طریق مبدل متصل شده میان رotor و شبکه، کنترل می‌گردد. چندین مدل برای DFIG در نرم‌افزار Power Factory ایجاد شده است. در این مقاله از مدلی که بهره‌بردار بتواند شین ژنراتور را به صورت PQ یا PV انتخاب نماید، استفاده شده است. در شکل (۱) طرح شماتیک نیروگاه بادی شبیه‌سازی شده که به صورت مستقیم به شبکه متصل گردیده، نمایش داده شده است.



شکل (۱): شماتیک مداری DFIG

معادلات الکتریکی مدل‌سازی شده در قاب مرجع برای DFIG در فرمول‌های (۱) تا (۴) آورده شده است. نمادهای گرافیکی  $\omega$ ,  $R$ ,  $L$ ,

می‌باشد [۴]. در نتیجه تحقیقات و مطالعات جایابی و مقداریابی

گوناگونی صورت گرفته و یافته‌های متفاوتی بدست آمده است [۶, ۵]. برای نمونه با استفاده از الگوریتم زنبور عسل با توجه به تلفات کل سیستم به جایابی و مقدار یابی تولیدات پراکنده پرداخته شده است [۷]. در [۸] از الگوریتم ازدحام ذرات برای تعیین کمترین هزینه، آلدگی با در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم استفاده شده است. در [۹] از الگوریتم مورچگان به منظور جایابی و مقدار یابی تولیدات پراکنده به منظور بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم استفاده شده است. در [۱۰] از الگوریتم کرم شب تاب با توجه بهبود پروفیل ولتاژ و تلفات اکتیو بهره‌گیری شده است. در [۱۱] از یک روش تحلیلی به منظور کاهش تلفات سیستم با در نظر گرفتن منابع پراکنده مختلف استفاده شده است. در [۱۲] از الگوریتم ژنتیک به منظور جایابی و مقداریابی تولیدات پراکنده با در نظر گرفتن مدل بار به منظور کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ استفاده شده است. در [۱۳] از ترکیب الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات به منظور کاهش تلفات و بهبود ولتاژ سیستم استفاده شده است. در [۱۴] از الگوریتم سیستم ایمنی به منظور کاهش تلفات و هزینه سیستم استفاده شده است. در [۱۵] از ترکیب الگوریتم جهش قویاباغه و تفاضلی به منظور بهینه‌سازی تلفات، هزینه و آلدگی در مساله جایابی و مقداریابی تولیدات پراکنده استفاده شده است.

باید توجه داشت که نفوذ روزافزون تولیدات پراکنده در سیستم‌های قدرت به طور قابل توجهی ممکن است شبکه را تحت تأثیر قرار دهد. لازم به ذکر است این اثرات متمایز نتایج متمایزی از بهره‌برداری از این تجهیزات را منجر می‌شود. بدین منظور در این پژوهش از جایابی چند هدفه شامل تلفات اکتیو، تلفات راکتیو و هزینه به منظور تولید تابع هدف انعطاف پذیر و قابل انتساب با خواصهای بهره‌بردار سیستم استفاده شده است. با توجه به اینکه انواع تولیدات پراکنده از نظر هزینه، نوع تاثیر گذاری و ظرفیت، متفاوت می‌باشند لذا هر کدام را با توجه به خصوصیت فنی خود مورد بررسی قرار گرفته است.

این مقاله از روش مبتنی بر ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات و منطق فازی، در حل مساله تعیین محل و ظرفیت منابع تولید پراکنده برای سیستم قدرت استفاده کرده است. علت استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، بهینه‌سازی هم زمان مکان و اندازه می‌باشد. همچینین با توجه به این که نمی‌توان همه حالات و شرایط تابع هدف بهینه‌سازی را به وسیله یک مدل جامع در نظر گرفت، به منظور استنتاج نتایج بهینه‌سازی از منطق فازی بهره‌گیری شده است.

جهت شبیه‌سازی شبکه قدرت از نرم‌افزار تجاری Power Factory استفاده شده است. این نرم‌افزار در کمپانی آلمانی DIGSILENT GmbH توسعه یافته است. امروزه بیش از ۸۰ کشور از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی و پیاده‌سازی محاسبات لازم در

توجه به این امر که تصمیم تخصیص نمی‌تواند صرفاً براساس صرفه‌جویی باشد، در برخی موارد صرفه‌جویی در هزینه سرمایه‌گذاری باعث کاهش سود حاصله و در نهایت به ضرر سرمایه‌گذار منجر می‌گردد؛ بنابراین تابع هدف به حداقل رساندن هزینه، تلفات اکتیو و راکتیو می‌باشد.

### ۱-۳-تابع تلفات

یکی از شاخص‌های اساسی مورد بررسی در جایابی تولیدات پراکنده کاهش تلفات کل سیستم می‌باشد. از رابطه (۶) تلفات سیستم مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

$$P_{Loss} = P_{generation} - P_{load} \quad (6)$$

که در آن محدودیت ولتاژ و جریان در محدوده مجاز نگه‌داری می‌شود.

$$V_{min} \leq V_{bus} \leq V_{max} \quad (10)$$

$$I \leq I_{rated} \quad (11)$$

که در آن  $V$  ولتاژ شین و  $I$  جریان فیدر می‌باشد [۱۸].

### ۲-۳-تابع هزینه

تابع هزینه را می‌توان با توجه به روابط ریاضی زیر محاسبه نمود.

$$F_{TotalCost} = \sum_{i=1}^{N_{FC}} C_{FC}(P_{FC}) + \sum_{i=1}^{N_{Wind}} C_{Wind}(P_{Wind}) + \sum_{i=1}^{N_{PV}} C_{PV}(P_{PV}) \quad (12)$$

$$C(P) = a + b \times P \quad (13)$$

$$a = \frac{Capital\ Cost(\frac{\$}{KW}) \times Capacity(KW) \times Gr}{Life\ time(Year) \times 365 \times 24 \times LF} \quad (14)$$

$$b = Fuel\ Cost(\frac{\$}{KWh}) + O\&MCost(\frac{\$}{KWh}) \quad (15)$$

جدول (۱) جزئیات تابع هزینه برخی از تولیدات پراکنده را نشان می‌دهد. بر این اساس می‌توان هزینه هر کدام از تولیدات پراکنده را با توجه به فرمول‌های (۱۵-۱۳) محاسبه کرد. همچنین LF و Gr به ترتیب نرخ سود سالانه و شاخص بارگذاری تولیدات پراکنده می‌باشد [۱۹].

X و  $\Psi$  به ترتیب نشان دهنده ولتاژ، مقاومت، جریان، راکتانس، شار می‌باشند. اندیس‌های  $s$ ،  $r$  نشان دهنده وابستگی به روتور و استاتور هستند. در اندیس‌های مرکب  $s$ ،  $r$  نشان دهنده لغزش و سرعت سنکرون می‌باشد [۱۶].

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Psi_{qs} \\ \Psi_{ds} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = -R_r \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Psi_{qr} \\ \Psi_{dr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_s i_{ds} + X_m i_{dr} \\ X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_r i_{dr} + X_m i_{ds} \\ X_r i_{qr} + X_m i_{qs} \end{bmatrix} \quad (4)$$

معادلات (۱) تا (۴) را می‌توان برای استفاده مناسب به صورت

معادلات (۵) تا (۸) در مبنای واحد برای هر قسمت بازنویسی کرد.

$$\bar{u}_{dq} = -R_s \bar{i}_{dq} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d \bar{\Psi}_{dq}}{dt} + j \bar{\Psi}_{dq} \quad (5)$$

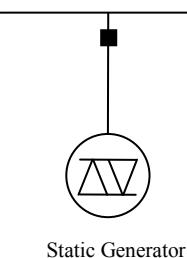
$$\bar{u}_{qr} = -R_r \bar{i}_{qr} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d \bar{\Psi}_{qr}}{dt} + j s \bar{\Psi}_{qr} \quad (6)$$

$$\bar{\Psi}_{dq} = -X_s \bar{i}_{dq} - X_m \bar{i}_{qr} \quad (7)$$

$$\bar{\Psi}_{qr} = -X_r \bar{i}_{qr} - X_m \bar{i}_{dq} \quad (8)$$

### ۲-۲-مدل‌سازی پیل سوختی و نیروگاه خورشیدی

سیستم نیروگاه خورشیدی و پیل سوختی که در این مقاله استفاده شده است. توسط یک ژنراتور استاتیک، مانند شکل (۲) ایجاد شده است. این مدل یک مدل عمومی می‌باشد که در نرم‌افزار DIGSILENT موجود می‌باشد [۱۷].



شکل (۲): شماتیک مداری ژنراتور استاتیک

### ۳-بیان مساله

قرار دادن منابع انرژی پراکنده با هدف کاهش تلفات سیستم و حداقل رساندن سود حاصل ناشی از قرارگیری مناسب است. با

ذکر است هر کدام از اجزا این الگوریتم‌ها به خودی خود، تنها و بدون ارسال تجارب شخصی این قابلیت را ندارند [۲۰].

## ۶-الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک جستجوگر تابع هدف مبتنی بر جمعیت می‌باشد. این الگوریتم بهینه‌سازی اولین بار توسط Kennedy و Eberhart در سال ۱۹۹۵ معرفی گردید [۲۱]. در الگوریتم ازدحام ذرات جمعیت swarm و هر فرد particle تشکیل می‌شود. الگوریتم ازدحام ذرات از تعداد زیادی عناصر(ذرات) تشکیل شده است که هر کدام دارای حرکات ساده، پویا، حافظه و هوش می‌باشند. هر ذره با بهره‌گیری از تجربه شخصی خود و دیگر ذرات سعی در جستجوی محیط اطراف خود را دارد. این ذرات در هر تکرار می‌توانند بهترین موقعیت شخصی یا محلی را جذب نمایند. این الگوریتم برای بهینه‌سازی از تجربه تمام ذرات به صورت مستقیم و غیرمستقیم بهره می‌گیرد. به دلیل تصادفی بودن پایش انجام شده باعث ایجاد یک پایش پیوسته تجزیه و تحلیل بهینه داده‌ها می‌گردد.

حرکت ذره  $i$  به منظور جستجوی فضای تابع از سه بردار حرکت حاصل می‌شود. فرمول (۱۶) مربوط به بردار مکان جسم، فرمول (۱۷) بهترین حرکت شخصی ذره، فرمول (۱۸) مربوط به بردار سرعت می‌باشد [۲۲].

$$\vec{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}) \quad (16)$$

$$\vec{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ij}) \quad (17)$$

$$\vec{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ij}) \quad (18)$$

این ذرات در فضای جستجو حرکات خود را انجام می‌دهند و با استفاده از فرمول (۱۹) سرعت و مکان هر ذره به طور پیوسته در هر تکرار به روزرسانی می‌شود. در این الگوریتم هر ذره در واقع ارایه دهنده یک راه حل برای تابع هدف می‌باشد.

$$v_{ij}^{k+1} = \omega v_{ij}^k + c_1 \epsilon_1 (p_{best_{ij}}^k - x_{ij}^k) + c_2 \epsilon_2 (p_{gbest_j}^k - x_{ij}^k) \quad (19)$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad (20)$$

که در آن  $k$  تعداد تکرار،  $\omega$  ضریب اینرسی،  $c_1, c_2$  عدد تصادفی و  $\epsilon_1, \epsilon_2$  ضریب یادگیری می‌باشند. بهترین وضعیت قبلی ذره آنم به عنوان  $p_{best}$  و بهترین موقعیت قبلی در میان تمام ذرات  $p_{gbest}$  نشان داده شده است.

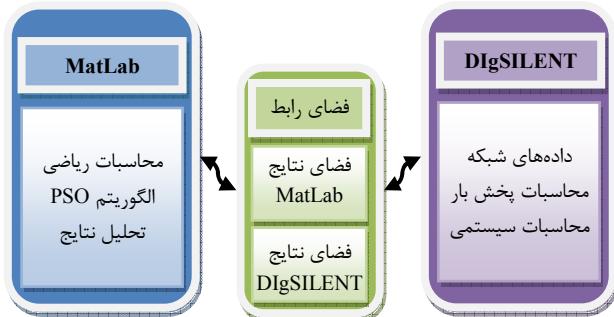
باید توجه داشت موقوفیت این الگوریتم تابع تنظیم صحیح پارامترها می‌باشد. بر این اساس ضریب اینرسی معادل  $\alpha$  در نظر گرفته شده

جدول (۱): مقایسه اقتصادی تولیدات برق

|                    | Rated capacity (kW) | Capital cost (\$/kW) | Fuel cost (\$/kW h) | Operation & maintenance cost(\$/kW h) | Life time (year) |
|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------------------|------------------|
| Fuel cell with CHP | ۲۰۰                 | ۳۶۷۴                 | ۰۰۰۲۹               | ۰۰۰۱                                  | ۱۰               |
| Photovoltaic       | ۱۰۰                 | ۶۶۷۵                 | ۰                   | ۰۰۰۰۵                                 | ۲۰               |
| Small wind turbine | ۱۰                  | ۲۸۶۶                 | ۰                   | ۰۰۰۰۵                                 | ۲۰               |
| Big wind turbine   | ۱۰۰۰                | ۱۵۰۰                 | ۰                   | ۰۰۰۰۵                                 | ۲۰               |

## ۴- ترکیب DIgSILENT و MatLab

در این مقاله یک برنامه واسط اطلاعاتی پیوسته دو طرفه با استفاده از زبان برنامه‌نویسی در MatLab و DIgSILENT طراحی گردیده است. این رویکرد به منظور ترکیب مزایای غیرقابل انکار دو نرمافزار فوق الذکر استفاده شده است. در نرمافزار DIgSILENT قابلیت تجزیه و تحلیل سیستم‌های قدرت و نرمافزار MatLab قابلیت برنامه‌نویسی کارا و انعطاف‌پذیر مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل (۳) به صورت ساده این روش بیان شده است. تبادل اطلاعات محاسبه شده با استفاده از یک فایل واسط صورت می‌گیرد. این فضای داده مشترک در خارج از دو نرم افزار ایجاد گردیده است و امکان گسترش و ارتباط با دیگر نرمافزارهای تحلیلی و محاسباتی را دارا می‌باشد. همچنین روش پیاده‌سازی شده محدود به این مقاله نمی‌باشد و قابلیت گسترش و استفاده در دیگر جنبه‌های محاسباتی و روش‌های شبیه‌سازی میان این دو نرم افزار را دارا می‌باشد.



شکل (۳): انتقال داده بین DIgSILENT/MatLab

## ۵-الگوریتم بهینه سازی مکان و ظرفیت

روش‌های مبتنی بر هوش تجمعی مانند الگوریتم ازدحام ذرات، زنبورها، موریانه‌ها و ... برای حل مسائل ترکیبی مناسب می‌باشند. این روش‌ها دارای دو شاخص برجسته هستند. هوشمند بودن، به دلیل اینکه از یک راه حل به راه حل دیگری می‌رسند و شاخص دوم تجمعی بودن که به دلیل ارتباط با یکدیگر صورت می‌گیرد. لازم به

## ۷-سیستم فازی

به منظور تصمیم‌گیری به صورت تحلیلی با استفاده از یک روش نظاممند محاسباتی در مورد اطلاعات می‌توان از منطق فازی استفاده کرد. منطق فازی یک روش برای نتیجه‌گیری با توجه به قوانین فازی می‌باشد که شایع‌ترین آن‌ها استفاده از اگر - آنگاه است. سیستم فازی داده‌های خام و تحلیل نشده را دریافت می‌کند سپس با استفاده از فازی سازی آن‌ها، با توجه به تعیین درجه عضویت هر داده و بررسی قواعد فازی تعریف شده، نتیجه پیش‌بینی شده را گزارش می‌دهد. سیستم استنتاج فازی در واقع پیاده‌سازی یک تناظر غیرخطی از فضای ورودی به فضای خروجی می‌باشد.

مراحل نتیجه‌گیری فازی:

- گرفتن ورودی
- فازی سازی ورودی‌ها
- اجرای قواعد و عملگرهای فازی
- فازی زدایی
- جمع‌بندی خروجی

مساله بهینه‌سازی مورد بررسی در این مقاله دارای ۳ تابع هدف می‌باشد و هر کدام از توابع هدف اطلاعات مربوط به خود را از نظر توابع عضویت و قواعد فازی داراست لذا الگوریتم مورد استفاده جهت بهینه‌سازی نیز باید با در نظر گرفتن ۳ تابع هدف شبیه‌سازی گردد. تابع ورودی به تفکیک شامل هزینه تولیدات پراکنده، تلفات اکتیو و راکتیو استوار می‌باشد.

به منظور کارایی بیش‌تر محاسبات ابتدا شاخص تلفات اکتیو و راکتیو توسط منطق فازی مقایسه گردیده، پس از نرمالیزه کردن تابع هزینه به صورت جداگانه با نتایج فازی شده تلفات اکتیو و راکتیو مقایسه می‌شود. با به کارگیری این روش چند لایه، علاوه بر کاهش ماتریس تصمیم‌گیری فازی و بهبود دقت فازی سازی باعث یافتن جواب بهتر می‌گردد. سپس این شاخص‌ها با توجه به روش گفته شده در هر تکرار الگوریتم ازدحام ذرات به سیستم فازی که در جعبه افزار Fuzzy Logic در MatLab شبیه‌سازی شده و اعمال می‌شود با استفاده از کلاسه بندهای ارایه شده مکان‌های مختلف نصب تولیدات پراکنده را مورد بررسی قرار داده و در نتیجه بهترین مکان براساس منطق فازی توسط الگوریتم ازدحام ذرات مشخص می‌گردد.

## ۷-توابع عضویت و قواعد سیستم فازی

تعیین بهترین شین برای نصب تولیدات پراکنده با استفاده از منطق فازی صورت می‌گیرد. متغیرهای ورودی به منطق فازی شامل شاخص‌های قدرت هر یک از باس‌ها می‌باشند. تابع عضویت خروجی بهترین مکان را مشخص می‌نماید. تمام توابع عضویت فازی شکل (۵) و (۶) دارای پنج بخش خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد می‌باشند. البته تمام متغیرهای ورودی با توجه به تابع عضویت خود

است، که در آن  $\varphi$  برابر  $4.1$  و مقدار  $\varphi_1, \varphi_2$  مساوی می‌باشند [۲۳]. در این مقاله تعداد ذرات و تکرار  $100$  در نظر گرفته شده است.

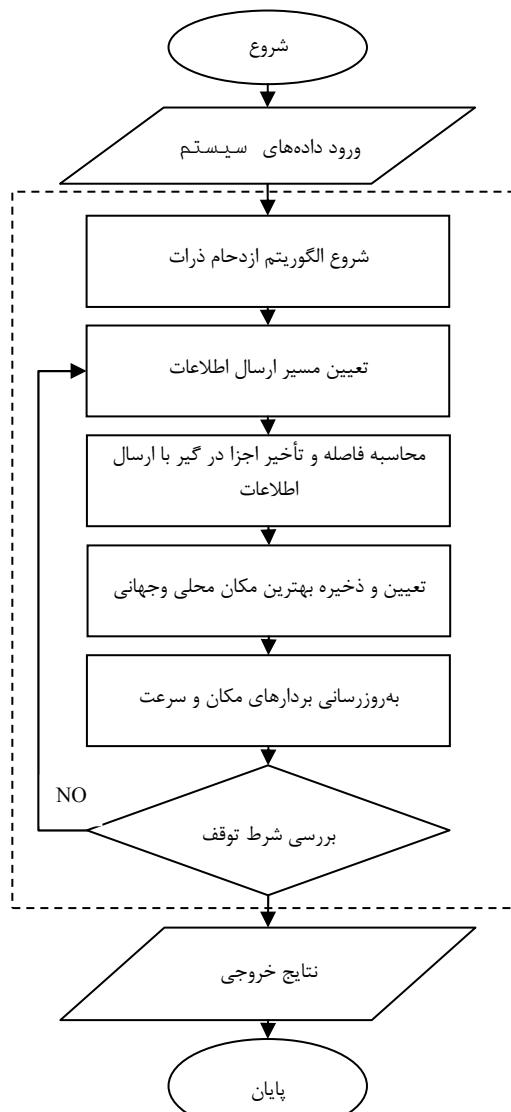
$$\chi = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} \quad (21)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (22)$$

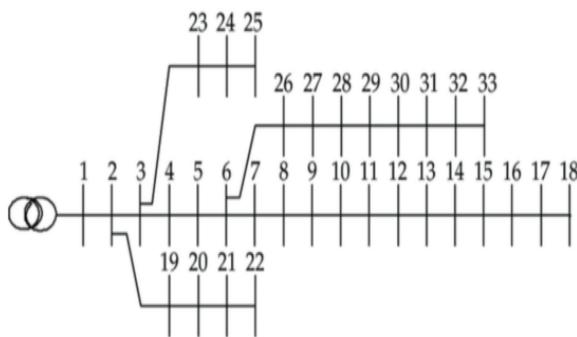
$$c_1 = \chi \varphi_1, c_2 = \chi \varphi_2 \quad (23)$$

مسئله بهینه‌سازی مورد بررسی در این مقاله دارای تابع هدف کاهش هزینه و تلفات اکتیو و راکتیو به صورت هم زمان می‌باشد، که به محل، اندازه و نوع تولیدات پراکنده وابسته است. هر کدام از ذرات اطلاعات مربوط به خود را از نظر توابع و هزینه نهایی دارا بوده. لذا الگوریتم مورد استفاده جهت بهینه‌سازی نیز باید با در نظر گرفتن تابع هدف شبیه‌سازی گردد.

داده‌ها، بر اساس الگوریتم ازدحام ذرات در MatLab پیاده‌سازی و اعمال می‌شود. نهایتاً مکان و مقدار مناسب مشخص می‌گردد.



شکل (۴): روند نهایی الگوریتم بهینه‌سازی



شکل (۷): دیاگرام تکخطی شبکه شینه ۳۳ IEEE

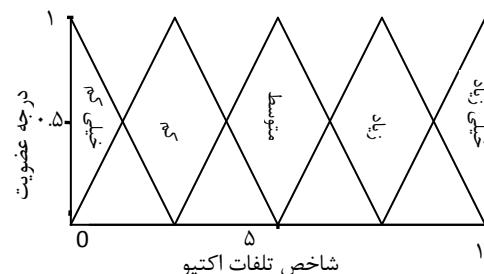
تعداد منابع تولید پراکنده ۱۰ عدد شامل ۴ منبع بادی، ۴ منبع سلول سوختی و ۲ منبع خورشیدی می‌باشد. پیشنهاد ارایه شده توسط الگوریتم ازدحام ذرات به منظور جایابی در هر تکرار مبتنی بر شبکه تست نشان داده شده است. که به صورت هم زمان به بهینه‌سازی مکان و ظرفیت این تولیدات می‌پردازد. در این شبیه‌سازی بارها به صورت PQ و ثابت در نظر گرفته شده اند. به منظور بررسی تاثیر نصب تولیدات پراکنده در مطالعات متفاوت سه حالت در نظر گرفته شده است.

- بررسی سیستم با تابع هدف تلفات اکتیو
- بررسی سیستم با تابع هدف تلفات راکتیو
- بررسی سیستم با تابع هدف تلفات اکتیو، راکتیو و هزینه به منظور بهره‌وری بیشتر از تولیدات پراکنده، با توجه به اینکه اپراتور سیستم می‌تواند ظرفیت متغیری را از آن‌ها در مدار قرار دهد، این بررسی اجرا گردیده است. جدول (۳) جایابی و مقدار یابی تولیدات پراکنده به صورت هم زمان بر مبنای الگوریتم ازدحام ذرات و تابع هدف تلفات اکتیو صورت را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود پراکنده‌گی این تولیدات می‌تواند تأثیر آن‌ها در سیستم بیشتر نماید.

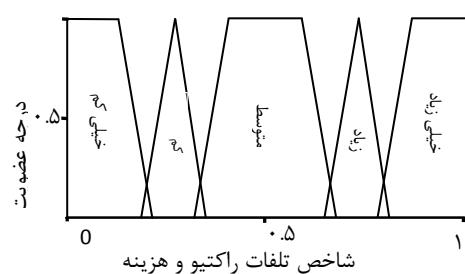
جدول (۳): بررسی نتایج شبیه‌سازی با تابع هدف تلفات اکتیو و راکتیو

| ظرفیت<br>(کیلووات) | محل | تابع هدف تلفات اکتیو |     | نوع انرژی<br>تجددی پذیر |
|--------------------|-----|----------------------|-----|-------------------------|
|                    |     | ظرفیت<br>(کیلووات)   | محل |                         |
| ۸۷۲.۹              | ۲۴  | ۷۸۰.۷                | ۶   | بادی                    |
| ۶۶۹.۶              | ۲۱  | ۸۶۳.۱                | ۲۴  |                         |
| ۴۸۲.۵              | ۱۹  | ۳۸۶.۷                | ۱۴  |                         |
| ۶۹۸.۲              | ۶   | ۶۸۲.۹                | ۳۱  |                         |
| ۹۴.۱               | ۲۱  | ۵۲.۱                 | ۱۰  | خورشیدی                 |
| ۱۰۰                | ۲۲  | ۹۸.۴                 | ۲۵  |                         |
| ۱۹۸.۶              | ۱۴  | ۱۹۶.۸                | ۸   |                         |
| ۲۰۰                | ۱۷  | ۱۵۶.۴                | ۲۲  |                         |
| ۲۰۰                | ۸   | ۱۶۴.۸                | ۲۰  | سلول<br>سوختی           |
| ۲۰۰                | ۱۲  | ۱۶۰.۱                | ۱۸  |                         |

تعریف می‌شوند که در شکل (۵) و (۶) قابل مشاهده می‌باشد.  
[۲۵، ۲۴]



شاخص توان اکتیو عضویت توابع شکل (۵):



راکتیو و هزینه شاخص توان عضویت شکل (۶): توابع

ماتریس قواعد تصمیم‌گیری در طراحی سیستم فازی برای تعیین مناسب‌ترین مکان نصب منابع تولید در جدول (۲) نشان داده شده است [۲۶].

جدول (۲): ماتریس تصمیم‌گیرهای فازی

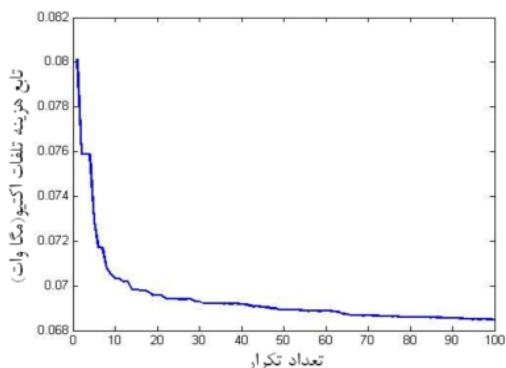
| شاخص تلفات اکتیو  |           | شاخص تلفات اکتیو |       |          |          |           |       |
|-------------------|-----------|------------------|-------|----------|----------|-----------|-------|
|                   |           | خیلی کم          | کم    | متوسط    | زیاد     | خیلی زیاد |       |
| شاخص تلفات راکتیو | خیلی کم   | خیلی بد          | بد    | بد       | بد       | بد        | متوسط |
|                   | کم        | خیلی بد          | بد    | متوسط    | متوسط    | متوسط     | خوب   |
|                   | متوسط     | بد               | متوسط | خوب      | خوب      | خیلی خوب  | خوب   |
|                   | زیاد      | بد               | متوسط | خوب      | خیلی خوب | خوب       | خوب   |
|                   | خیلی زیاد | متوسط            | خوب   | خیلی خوب | خیلی خوب | خوب       | خوب   |

## ۸- نتایج شبیه‌سازی

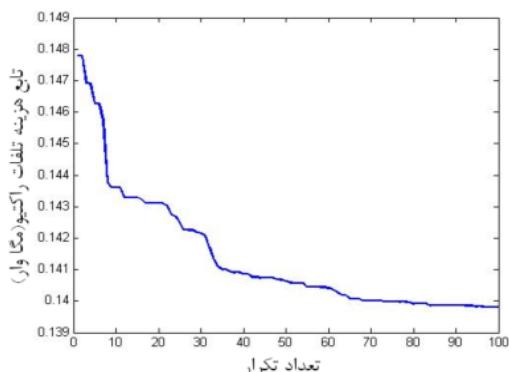
برای پیاده‌سازی روش ارائه شده از سیستم قدرت ۳۳ شینه IEEE نشان داده شده در شکل (۷) که در نرم‌افزار DIgSILENT برای این مطالعه اصلاح گردیده، استفاده شده است. شبکه مرتبط با نمودار خطی نشان داده شده دارای تلفات راکتیو ۰.۲۳۰۲ مگاوات و تلفات اکتیو ۰.۵۰۴۵ مگاوار بوده است. تنها منبع تامین این سیستم در شین یک قرار داده شده است.

همان‌طور که در جدول (۵) ملاحظه می‌شود. در حالت‌های اول و دوم اگر چه تلفات سیستم کاهش یافته است، اما شاخص هزینه لحاظ نشده است. بهینه‌سازی از استفاده از روش ترکیبی یعنی با لحاظ هزینه ضمن کاهش تلفات بطور کلی باعث کاهش هزینه به صورت چشم‌گیری گردیده است.

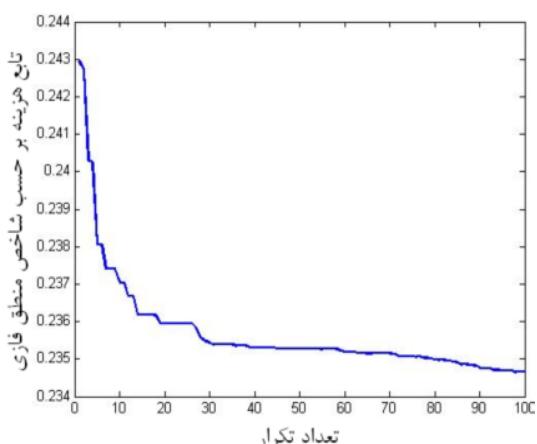
بنابراین الگوریتم ترکیبی قادر به پیدا کردن بهترین راه حل برای هر تابع هدف می‌باشد. با توجه به اولویت‌های بهره‌بردار سیستم قابلیت انعطاف داشته و می‌تواند انتخاب‌های گوناگون در گزینش تابع هدف به عمل آورد. نحوه همگرایی ۳ تابع هدف در شکل‌های (۸-۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۸): نمودار عملکرد الگوریتم در بهبود شاخص تلفات اکتیو



شکل (۹): نمودار عملکرد الگوریتم در بهبود شاخص تلفات راکتیو



شکل (۱۰): نمودار عملکرد الگوریتم در بهبود شاخص تلفات اکتیو، راکتیو و هزینه

در جدول (۳) جایایی و مقداریابی با توجه به تابع هدف تلفات اکتیو و راکتیو با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات ارایه شده است.

جایایی و مقداریابی ادوات با توجه به ترکیب توابع هزینه، تلفات اکتیو و راکتیو به صورت هم زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مقایسه صحیح توابع ذکر شده و تعیین بهترین تابع هدف، از منطق فازی بهره‌گیری شده است. منطق فازی ترکیب شده با الگوریتم ازدحام ذرات امکان تجزیه و تحلیل بهتر داده‌ها را با استفاده از قواعد سیستم فازی مهیا می‌سازد.

از آنجایی که داده‌های مشخص شده به صورت ورودی به منطق فازی داده می‌شود، بر اساس قوانین جدول (۱) تجزیه و تحلیل صورت گرفته و منطق فازی در نهایت یک عدد بین صفر تا ۱ به ما ارائه می‌دهد. هرچه عدد بدست آمده به ۱ نزدیک‌تر باشد محل انتخاب شده بهتر است. همانگونه که در جدول (۴) ملاحظه می‌گردد. تجزیه و تحلیل داده بهترین مکان‌های نصب منابع تولید تجدید پذیر با توجه به شاخص‌های داده شده جهت بهره‌وری بیش‌تر به ما نشان می‌دهد.

جدول (۴): بررسی نتایج شبیه‌سازی

| نوع انرژی تجدید پذیر | محل | ظرفیت(کیلووات) |
|----------------------|-----|----------------|
| بادی                 | ۲۴  | ۹۹۲.۵          |
|                      | ۳۱  | ۶۷۶.۲          |
|                      | ۱۱  | ۵۳۴.۳          |
|                      | ۲۶  | ۷۰۴.۸          |
| خورشیدی              | ۲۱  | ۷۰.۶           |
|                      | ۱۸  | ۹۷.۸           |
|                      | ۱۷  | ۸۰.۵           |
|                      | ۱۶  | ۶۰.۱           |
| سلول سوتی            | ۱۵  | ۲۸.۴           |
|                      | ۲۲  | ۷۸.۸           |

استفاده از روش منطق فازی ترکیب شده با الگوریتم ازدحام ذرات باعث می‌گردد توابعی که داری ماهیت ذاتی متفاوت از لحاظ مقداری و عملکرد بهینه‌سازی هستند، قابلیت مقایسه بهتر داشته باشند. جدول (۵) نتایج خروجی بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات - فازی را نشان می‌دهد.

جدول (۵): بررسی نتایج شبیه‌سازی

| حالات سوم | حالات دوم | حالات اول | تلفات                  |
|-----------|-----------|-----------|------------------------|
| ۷۰.۱۴۷    | ۶۸.۸۴۴    | ۶۸.۴۷۹    | اکتیو(کیلووات)         |
| ۱۴۴.۷۹۴   | ۱۳۹.۸۱    | ۱۴۰.۵۷۶   | تلفات راکتیو(کیلو وار) |
| ۶۲.۷۶۴۲   | ۸۰.۳۴۰۹   | ۸۰.۳۴۶۹   | هزینه(دلار بر ساعت)    |

- [7] F. S. Abu-Mouti and M. E. El-Hawary, "Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing in Distribution Systems via Artificial Bee Colony Algorithm," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 2090-2101, 2011.
- [8] A. Soroudi and M. Afrasiab, "Binary PSO-based dynamic multi-objective model for distributed generation planning under uncertainty," *Renewable Power Generation, IET*, vol. 6, pp. 67-78, 2012.
- [9] W. Lingfeng and C. Singh, "Reliability-Constrained Optimum Placement of Reclosers and Distributed Generators in Distribution Networks Using an Ant Colony System Algorithm," *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 757-764, 2008.
- [10] M. H. Sulaiman, M. W. Mustafa, A. Azmi, O. Aliman, and S. R. Abdul Rahim, "Optimal allocation and sizing of Distributed Generation in distribution system via Firefly Algorithm," in *Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malaysia, 2012 Ieee International*, 2012, pp. 84-89.
- [11] H. Duong Quoc, N. Mithulanthan, and R. C. Bansal, "Analytical Expressions for DG Allocation in Primary Distribution Networks," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 814-820, 2010.
- [12] D. Singh and K. S. Verma, "Multiobjective Optimization for DG Planning With Load Models," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 427-436, 2009.
- [13] M. Junjie, W. Yulong, and L. Yang, "Size and Location of Distributed Generation in Distribution System Based on Immune Algorithm," *Systems Engineering Procedia*, vol. 4, pp. 124-132, 2012.
- [14] H. Doagou-Mojarrad, G. B. Gharehpetian, H. Rastegar, and J. Olamaei, "Optimal placement and sizing of DG (distributed generation) units in distribution networks by novel hybrid evolutionary algorithm," *Energy*.
- [15] T. Niknam, H. Z. Meymand, H. D. Mojarrad, and J. Aghaei, "Multi-objective daily operation management of distribution network considering fuel cell power plants," *Renewable Power Generation, IET*, vol. 5, pp. 356-367, 2011.
- [16] C. Hamon, K. Elkington, and M. Ghandhari, "Doubly-fed induction generator modeling and control in DigSilent PowerFactory," in *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1-7.
- [17] J. Ramos Hernanz, Campayo Martín, J.J. Zamora Belver, I.Puelles Pérez, E., Motrico Gogeascochea, JA., Sancho Sáiz, J, "Dynamic Simulation of a Photovoltaic Installation," presented at the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'09), Valencia (Spain), 2009.
- [18] S. M. Hakimi, M. Zarringhalami, and S. M. M. Tafreshi, "Optimal capacitor placement and sizing in non-radial distribution to improve power quality," in *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on*, 2010, pp. 1-6.
- [19] T. Niknam, A. Kavousifard, S. Tabatabaei ,and J. Aghaei, "Optimal operation management of fuel

## ۹-نتیجه‌گیری

استفاده از منابع تولید پراکنده در شبکه‌های انرژی الکتریکی امریست که می‌تواند منافع و اثرات قابل ملاحظه‌ای را در بهره‌برداری شبکه‌های قدرت به دنبال داشته باشد. در این مقاله روش جامع برمنای الگوریتم ازدحام ذرات، منطق فازی چند لایه اصلاح شده برای بهینه‌سازی مکان و ظرفیت مناسب منابع پراکنده در یک سیستم استاندارد به منظور کاهش تلفات اکتیو و تلفات راکتیو و هزینه ارائه شده است. از الگوریتم ازدحام ذرات به منظور بهینه‌سازی برای تعیین مکان و مقدار تولیدات پراکنده و جهت استنتاج نتایج حاصله از منطق فازی استفاده شده است. ضمناً ولتاژ شین و جریان فیدرها به عنوان محدودیت‌ها در سطح استاندارد نگه داشته می‌شوند.

روش پیشنهادی با سیستم ۳۳ شینه IEEE ارزیابی و سپس با به کارگیری الگوریتم پیشنهادی و استفاده از فرآیند تصمیم‌گیری چند متغیره بر اساس منطق فازی بهترین محل و ظرفیت نصب بر روی شبکه تعیین گردید. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی ضمن بهبود هزینه سرمایه‌گذاری و کاهش تلفات سیستم به طور یقین سود چشم‌گیری نصیب شرکت‌های بهره‌برداری خواهد نمود.

## مراجع

- [1] H. Duong Quoc and N. Mithulanthan, "Multiple Distributed Generator Placement in Primary Distribution Networks for Loss Reduction," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 60, pp. 1700-1708, 2013.
- [2] M. H. Moradi and M. Abedini, "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 34, pp. 66-74, 2012.
- [3] W. El-Khattam and M. M. A. Salama, "Distributed generation technologies, definitions and benefits," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, pp. 119-128, 2004.
- [4] K. Nekooei, M. M. Farsangi, H. Nezamabadi-pour, and K. Y. Lee, "An Improved Multi-Objective Harmony Search for Optimal Placement of DGs in Distribution Systems," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 4, pp. 557-567, 2013.
- [5] R. Viral and D. K. Khatod, "Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16 ,pp. 5146-5165, 2012.
- [6] W.-S. Tan, M. Y. Hassan, M. S. Majid, and H. Abdul Rahman, "Optimal distributed renewable generation planning: A review of different approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 626-645, 2013.

ایران در رشته مهندسی برق- قدرت اخذ نموده است. ایشان هم اکنون عضو انجمن مهندسی برق و الکترونیک امریکا(IEEE) و از سال (۱۳۸۰) تاکنون عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول می باشند. زمینه تحقیقاتی ایشان مطالعات استاتیکی و دینامیکی سیستم‌های قدرت، پایداری و کنترل و ادوات FACTS می باشد.



سید علی نبی نیاکی در سال ۱۳۴۱ در آمل متولد شد. مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در سالهای ۱۳۶۶ و ۱۳۶۹ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و دکتری تخصصی خود را در سال ۱۳۷۵ از دانشگاه تورنتو کانادا در رشته مهندسی برق- قدرت اخذ نموده است. ایشان از سال ۱۳۷۵ عضو هیأت علمی دانشگاه مازندران بوده و در حال حاضر بعنوان پژوهشگر ارشد در دانشگاه تورنتو کانادا مشغول بکار می باشند. زمینه تحقیقاتی ایشان مطالعات استاتیکی و دینامیکی سیستم‌های قدرت، پایداری و کنترل و ادوات FACTS می باشد.

- cell/wind/photovoltaic power sources connected to distribution networks," *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 8881-8896, 2011.
- [20] P. Paliwal, N. P. Patidar, and R. K. Nema, "A comprehensive survey of optimization techniques used for Distributed Generator siting and sizing," in *Southeastcon, 2012 Proceedings of IEEE*, 2012, pp. 1-7.
- [21] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, 1995, pp. 1942-1948 vol.4.
- [22] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 58-73, 2002.
- [23] D. Bratton and J. Kennedy, "Defining a Standard for Particle Swarm Optimization," in *Swarm Intelligence Symposium, 2007. SIS 2007. IEEE*, 2007, pp. 120-127.
- [24] D. Y. Shih, G. W. Chang, G. S. Chuang, H. L. Wang, and S. Y. Chu, "A fuzzy-based algorithm for shunt capacitor planning in a distorted power system," in *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on*, 2010, pp. 1-7.
- [25] G. W. Chang, C. Wen-Chang, C. Ching-Sheng, and S. Dong-Yeen, "Fuzzy Logic and Immune-Based Algorithm for Placement and Sizing of Shunt Capacitor Banks in a Distorted Power Network," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 2145-2153, 2011.
- [26] S. G. Saranya, E. Muthukumaran, S. M. Kannan, and S. Kalyani, "Optimal capacitor placement in radial distribution feeders using fuzzy-Differential Evolution," in *Innovations in Emerging Technology (NCOIET), 2011 National Conference on*, 2011, pp. 85-90

## روزمه

میلاد کفایت در ۱۳۶۷ اهواز، ایران به دنیا آمده است. او درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد را در دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، در سال ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ به ترتیب گذرانده است. علیق پژوهشی او عبارتند از تاثیر تولیدات پراکنده بر سیستم قدرت، انرژی‌های تجدید پذیر، شبکه‌های هوشمند، روش‌های بهینه سازی و الگوریتم‌های تکاملی.

**افشین لشکرآرا** در سال (۱۳۵۲) در تهران متولد شد. مدارک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای خود را در سالهای (۱۳۷۴)، (۱۳۸۰) و (۱۳۸۹) بترتیب از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دانشگاه مازندران و دانشگاه علم و صنعت



