

# ارائه روشی مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند برای حل پخش بار احتمالی جهت برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها

نیما نیک مهر<sup>۱</sup> سجاد نجفی روادانق<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد- آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های توزیع هوشمند-گروه مهندسی برق-دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان  
[nima.alamdari@yahoo.com](mailto:nima.alamdari@yahoo.com), [n.nikmehr.eng@ieee.org](mailto:n.nikmehr.eng@ieee.org)

۲- دانشیار- آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های توزیع هوشمند-گروه مهندسی برق-دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان  
[s.najafi@azaruniv.edu](mailto:s.najafi@azaruniv.edu)

**چکیده:** یکی از مهم‌ترین اجزای شبکه توزیع در آینده منابع انرژی تجدیدپذیر هستند. عدم قطعیت در تولید توان منابع تجدیدپذیر از قبیل توربین بادی و سیستم خورشیدی و همچنین میزان بار مصرفی از دیگر ویژگی‌های این شبکه‌ها می‌باشد. روش‌های پخش بار معمولی به‌عنوان یک ابزار اساسی در مطالعات سیستم قدرت، ممکن است برای شبکه‌های فعال یا هوشمند از قبیل ریزشبکه‌ها مناسب نباشد. در این مقاله یک روش پخش بار مبتنی بر الگوریتم هیورستیک با در نظر گرفتن تأثیر رفتارهای احتمالی و نوسانی منابع انرژی تجدیدپذیر و بار به‌صورت الگوریتم پخش بار احتمالی مدل می‌شود. الگوریتم رقابت استعماری به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند برای فرمول‌بندی و حل مسئله پخش بار احتمالی به‌کار برده می‌شود. براساس تکنیک پخش بار احتمالی پارامترهای محاسبه‌شده سیستم از قبیل ولتاژ باس‌ها و جریان فیدرها به‌عنوان متغیرهای تصادفی هستند. جهت بررسی کارآمدی و قابلیت روش ارائه‌شده از شبکه ۳۳ باسه شعاعی-حلقوی ضعیف ارتقاء یافته IEEE با منابع تولید پراکنده استفاده می‌شود. نتایج به‌دست آمده با روش ارائه شده با روش شبیه‌سازی مونت کارلو مقایسه می‌شود. توابع توزیع احتمالی و تجمعی ولتاژ باس‌ها، توان عبوری از خطوط و تلفات کل شبکه حاصل از این دوروش باهم مقایسه می‌شوند.

**کلمات کلیدی:** پخش بار احتمالی، شبکه‌های توزیع هوشمند، عدم قطعیت، الگوریتم رقابت استعماری، روش شبیه‌سازی مونت کارلو.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۳۰

نام نویسنده مسئول: سجاد نجفی روادانق

نشانی نویسنده مسئول: آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های توزیع هوشمند-دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر-دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان

برای حل مسئله پخش بار احتمالاتی روش های متعددی ارائه شده‌اند که در یک دسته بندی کلی در یکی از دسته های زیر جای می‌گیرند:

- روش عددی یا تکنیک مونت کارلو که یکی از رایج ترین شیوه‌ها در حل مسئله پخش بار احتمالی است. در این روش برای متغیرهای غیرقطعی مسئله تعدادی مقادیر به صورت تصادفی با توجه به توابع توزیع احتمالی این متغیرها تولید می‌شوند و مسئله به صورت قطعی برای تمام این مقادیر حل می‌شود. مزیت اصلی این روش در سادگی پیاده‌سازی و اجرای آن است، هرچند نیاز به انجام شبیه‌سازی‌های زیاد جهت رسیدن به همگرایی از نقاط ضعف آن به شمار می‌رود [۸].
- روش‌های تقریبی از قبیل روش تخمین دو نقطه‌ای که در آن تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی با دو نقطه متمرکز در زیر و بالای مینگین تقریب زده می‌شود. بنابراین برای هر متغیر تصادفی و به‌ازاء هریک از این نقاط یک بار مسئله پخش بار قطعی اجرا خواهد شد [۹].
- روش تحلیلی که در آن با استفاده از ترکیب مفهوم کمولانت و بسط سری گرام-چارلییر، تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی بدست می‌آید [۱۰].

در مرجع [۱۱] سه روش مختلف حل مسئله پخش بار بهینه احتمالاتی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. طبق نتایج بدست آمده، روش مونت کارلو به دلیل عدم استفاده از روش‌های تقریبی جهت رسیدن به نتایج دقیق‌تر نیازمند نمونه‌گیری‌های بیشتری از داده‌های ورودی است. به‌طور کلی برای سیستم‌های با نمونه‌های بالاتر روش مونت کارلو و برای سیستم‌های با نمونه‌گیری کمتر روش تخمین نقطه‌ای مناسب هستند. روش تخمین دو نقطه‌ای معمولی قادر به در نظر گرفتن ارتباط و همبستگی بین پارامترهای متغیر ورودی نمی‌باشد. در [۱۲] روش تخمین دو نقطه‌ای اصلاح شده برای در نظر گرفتن این همبستگی در حل مسئله پخش بار احتمالی ارائه شده است. در [۱۳] از تکنیک نمونه‌گیری یکنواخت برای ایجاد ارتباط بین متغیرهای ورودی استفاده کرده است. روش مونت کارلو مبتنی بر پخش بار فازی در [۱۴] ارائه شده است. طبق این روش، برای شبکه‌های شعاعی در برخی نمونه‌ها از روش جاروب پسر-پیشرو به‌کار برده می‌شود.

در [۱۵]، روش کنترل بهینه به‌منظور بررسی پایداری یک ریزش‌بکه جزیره‌ای مورد تحقیق قرار گرفته است. در مرجع [۱۶]، از سیستم های قدرت بهم پیوسته با نواحی انرژی مقیاس کوچک و جریان مستقیم برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه استفاده شده است. در این راستا، در تحقیقات تازه از ریزش‌بکه‌های چندگانه برای بهره‌برداری سیستم‌های انرژی بهره گرفته می‌شود. برای نمونه در مرجع [۱۷-۱۸]، از ریزش‌بکه‌های بهم پیوسته جهت کمینه سازی هزینه‌های بهره‌برداری ریزش‌بکه‌ها و همچنین کاهش آلاینده‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت طرف بار و تولید استفاده شده است.

عدم قطعیت های زیادی در سیستم های توزیع برق در سراسر جهان وجود دارد که عمده ی آنها بدلیل الگوی تجدید ساختار از یک سو و توسعه روز افزون انرژی های نو از سوی دیگر موجب شده است. در چنین سیستم هایی با پارامتر های احتمالاتی، پخش بار قطعی نمی تواند وضعیت دقیقی از آن سیستم ها را نشان دهد. بنابراین آنالیزهای احتمالاتی به‌عنوان راهکاری جذاب پیش رو قرار می‌گیرند. از آنجا که شرایط سیستم قدرت به طور مداوم (به دلایل متعدد چون تغییر بار باس ها، تغییر توان تولیدی ژنراتورها و قطع خطوط) در حال تغییر است برای ارزیابی شبکه تحت شرایط مختلف نیاز به اجرای پخش بارهای متعدد است. از آنجا که سیستم قدرت با نفوذ روزافزون منابع تجدیدپذیر با مشخصه های تصادفی روبروست نیاز به محاسبات متنوع پخش بار در نقاط کاری مختلف سیستم مطرح می شود. پخش بار احتمالاتی ابزاری مناسب برای ارزیابی کارایی سیستم قدرت در محدوده کاری محتمل آن است [۱]. با تعریف متغیرهای ورودی تصادفی پخش بار، امکان تعیین رفتار احتمالاتی متغیرهای خروجی فراهم خواهد شد. پخش بار احتمالاتی با تأمین کردن اطلاعاتی در نقاط کار متنوع سیستم قدرت، دارای کاربرد وسیعی در مطالعات طراحی سیستم قدرت است.

پخش بار احتمالاتی نخستین بار در سال ۱۹۷۰ در [۲] مطرح شد. در این روش، شبکه با مدل DC نمایش داده می شود و با فرض مستقل بودن بار باس‌ها از یکدیگر ابتدا پخش بار سنتی (قطعی) اجرا می‌شود. در این پخش بار، بارها بر اساس مقدار متوسط تعریف شده خود هستند. در مرجع [۳] مسئله با در نظر گرفتن مدل AC شبکه مورد بحث قرار گرفته شده است. در مرجع [۴] پخش بار احتمالاتی به حوزه سه فاز بسط داده شده است تا عدم قطعیت هایی که تحت تاثیر شرایط عملیاتی حالت ماندگار یک سیستم قدرت نامتعادل می باشند، مورد ارزیابی قرار گیرند.

از نتایج حاصل از مسئله پخش بار احتمالی می‌توان در سایر مطالعات سیستم قدرت استفاده کرد. مثلاً موضوع کنترل ولتاژ و بارهای کنترل سیستم از طریق مسئله پخش بار احتمالی در مراجع [۵-۶] مورد تحقیق قرار گرفته شده است. موضوع اساسی در این مراجع کنترل متغیرهایی از قبیل تپ های ترانسفورماتور، تجهیزات جبران ساز موزی و ولتاژها در باس های کنترل ولتاژ در مسئله پخش بار می باشد چرا که این متغیرها دارای رفتارهای احتمالاتی هستند. یکی دیگر از کاربردهای پخش بار بهینه احتمالاتی در مبحث بازار برق می‌باشد. با توجه به عدم قطعیت در برخی از پارامترهای سیستم قدرت، استفاده از ابزار احتمالی در مبحث بازار برق اجتناب ناپذیر می‌باشد. برای تعیین قیمت برق از طرف شرکت‌ها، در مرجع [۷] از پخش بار بهینه با تحلیل احتمالی بهره گرفته شده است تا تاثیر رفتار شرکت کنندگان بر روی هزینه برق مورد ارزیابی قرار گیرد.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

در رابطه بالا  $X$  نشان دهنده متغیر تصادفی یا توان مصرفی می باشد که به ازای هر  $X$  یک عدد برای تابع  $f(x)$  به دست می آید. میزان بارهای اکتیو و راکتیو مصرفی در هر باس را براساس میزان پراکندگی بارها از مقدار میانگین می توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$P_{1,i}^{sch} = P_{1,i0}^{sch} + r\Delta P_1 P_{1,i0}^{sch}$$

$$Q_{1,i}^{sch} = Q_{1,i0}^{sch} + r\Delta Q_1 Q_{1,i0}^{sch}$$

$$r \in (-1, 1)$$

$$0 < \Delta P_1 < P_{1,i0}^{sch}$$

$$0 < \Delta Q_1 < Q_{1,i0}^{sch}$$

(2)

در رابطه بالا،  $P_{1,i}^{sch}$  و  $Q_{1,i}^{sch}$  به ترتیب توان های حقیقی و غیرحقیقی مصرفی برنامه ریزی شده در باس  $i$  است.  $P_{1,i0}^{sch}$  و  $Q_{1,i0}^{sch}$  توان های اولیه حقیقی و غیرحقیقی مصرفی برنامه ریزی شده در باس  $i$ ،  $r$  عددی تصادفی بین  $-1$  و  $+1$  می باشد.  $\Delta P_1$  و  $\Delta Q_1$  تعیین کننده میزان انحراف توان های اکتیو و راکتیو از مقدار اولیه هستند. به عبارتی توان های حقیقی و راکتیو مصرفی به ترتیب به اندازه  $\Delta P_1$  و  $\Delta Q_1$  در هر نمونه از مقدار میانگین توان ها فاصله می گیرد که مقدار  $r$  این فاصله یا پراکندگی را می تواند تنظیم نماید.

### ۳- مدل احتمالی توان تولیدی توربین بادی

سرعت باد به طور پیوسته در حال تغییر است. میزان متوسط مشخص شده برای یک منطقه خاص صرفاً نمی تواند میزان تولید توربین بادی نصب شده در آن منطقه را مشخص کند. برای مشخص کردن فراوانی سرعت باد در یک منطقه در چنین حالتی می توان از توابع توزیع احتمالی بهره گرفت. تابع توزیعی که در مدل سازی سرعت باد کاربرد بیشتری دارد، توزیع ویبال\* است. در بسیاری از مطالعات انجام شده، پیشنهاد شده است تا از توزیع ویبال به عنوان تابع توزیع احتمالاتی سرعت باد استفاده شود [۲۱]. رابطه (۳) رابطه عمومی یک توزیع ویبال با متغیر  $X$  را با پارامتر مقیاس  $\lambda$  (Scale) و پارامتر شکل  $K$  (Shape) بیان می کند:

$$\text{Weibull}(\lambda, K) = \lambda K X^{K-1} \exp[-\lambda X^K] \quad (3)$$

برای سرعت باد از همین توزیع احتمالی بر اساس رابطه زیر استفاده می کنیم:

$$f(V) = \frac{h}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{h-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^h\right] \quad (4)$$

در مقاله ارائه شده، از یک روش جدید که برای اولین بار مطرح می شود، برای حل مسئله پخش بار احتمالی بهره گرفته می شود. روش ارائه شده مبتنی بر الگوریتم های هوشمند می باشد. با استفاده از روش ارائه شده دامنه ولتاژ باس ها، زاویه فاز ولتاژ شینه ها و حتی توان های عبوری از خطوط شبکه اعم از توان های اکتیو و راکتیو و همچنین تلفات شبکه که همگی به عنوان نتایج خروجی هستند، در فرم تابع توزیع احتمالی یا در قالب تابع توزیع تجمعی نشان داده می شوند.

سهم اصلی و نوآوری مقاله را می توان به صورت زیر بیان کرد:

حضور منابع انرژی تجزیدپذیر در شبکه های توزیع سنتی، نه تنها باعث تغییری در ساختار شبکه توزیع از حالت شعاعی به حالت شعاعی-حلقوی می شود بلکه به خاطر عدم قطعیت ها و نوسانات منابع تولید پراکنده و بارهای مصرفی، بهره برداری برنامه ریزی سیستم های قدرت تحت تاثیر قرار می گیرند. در شبکه های توزیع هوشمند که منابع تولید پراکنده نقش اساسی در تولید توان دارند، نسبت مقاومت به راکتانس ( $R/X$ ) بالا بوده و همواره در حال تغییری می باشد. در این شرایط روش های مانند نیوتن-رافسون و جاروب پسر و پیشرو توانایی حل مسئله پخش بار در محیط ری ز شبکه ها را نخواهند داشت. روش نیوتن-رافسون برای شبکه های حلقوی و روش جاروب پسر و پیشرو برای شبکه های شعاعی مناسب هستند. یکی از مزیت های روش ارائه شده در این مقاله حل مسئله پخش بار در حضور منابع تولید پراکنده با نرخ  $R/X$  بالا می باشد که بدون در نظر گرفتن ساختار شبکه قادر به حل مسئله با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای پارامترهای ورودی است. برای نشان دادن صحت، درستی و حتی دقت روش ارائه شده، نتایج بدست آمده با نتایج حاصله از روش مونت کارلو که دقیق ترین روش در حوزه پخش بار احتمالی تلقی می شود، مقایسه خواهند شد.

### ۲- مدل احتمالی بار مصرفی

بار تا حد زیادی به فعالیت های بشری و فاکتور زمانی بستگی دارد. تغییرات بار بصورت پیوسته می باشد و این تغییرات با عدم قطعیت همراه است. در تئوری احتمالات، بار غیر قطعی می تواند توسط تابع چگالی احتمالی که مناسب رفتار بار در هر لحظه می باشد، تنظیم شود. به عبارتی در پخش بار قطعی، بارهای مصرفی بصورت ثابت و بدون هیچ تغییری در نظر گرفته می شوند. در حالیکه در عمل و واقعیت بارها در هر لحظه از زمان در حال تغییرند و برای مدل کردن این تغییرات از تابع توزیع احتمالی بجای عدد ثابت بهره گرفته می شود. در این مقاله از تابع توزیع نرمال برای مدل سازی بار در هر باس استفاده می کنیم. تابع چگالی احتمال برای توزیع نرمال بر حسب امید ریاضی و واریانس تعریف می شود. و تابع آن به صورت زیر است [۱۹-۲۰]:

\* Weibull distribution function

هوشمند یا بهینه‌سازی کمینه‌سازی یا به عبارتی دیگر مینیوموم‌سازی یک یا چند تابع هدف می‌باشد. در روش ارائه شده نیز مسئله پخش بار به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. روابط پخش بار به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$P_i^{cal} = V_i \sum_{j=1}^{N_b} Y_{ij} V_j \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (7)$$

$$Q_i^{cal} = -V_i \sum_{j=1}^{N_b} Y_{ij} V_j \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (8)$$

که،  $P_i^{cal}$  و  $Q_i^{cal}$  توان‌های اکتیو و راکتیو محاسباتی در باس  $i$ ،  $\theta_{ij}$  زاویه فاز ماتریس ادمیتانس بین شین  $i$  و  $j$  و  $N_b$  تعداد باس‌ها است. توان‌های حقیقی و راکتیو برنامه‌ریزی شده در هر باس که به‌صورت خالص یا به‌عبارتی تفاضل توان تولیدی و مصرفی در هر باس است، به‌صورت زیر هستند:

$$P_i^{sch} = P_{ig} - P_{id} \quad (9)$$

$$Q_i^{sch} = Q_{ig} - Q_{id} \quad (10)$$

$P_i^{cal}$  و  $Q_i^{cal}$  توان‌های اکتیو و راکتیو برنامه‌ریزی شده،  $P_{ig}$  و  $Q_{ig}$  میزان توان‌های حقیقی و غیرحقیقی تولیدی در باس  $i$  و  $P_{id}$  و  $Q_{id}$  میزان توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی در باس  $i$  هستند. در روش‌های کلاسیک هرچقدر تفاضل توان‌های محاسبه شده و برنامه‌ریزی شده به عدد صفر نزدیک می‌شد، همگرایی روش بالاتر رفته و به جواب نهایی و دقیق نزدیک‌تر می‌شدیم. در حل مسئله با روش ارائه شده، الگوریتم‌های بهینه‌سازی این کار را انجام می‌دهند. تفاضل توان‌های محاسبه شده و برنامه‌ریزی شده حقیقی و راکتیو را به‌ترتیب با  $F_P$  و  $F_Q$  نشان می‌دهیم:

$$F_P = \sum_{\substack{i \in PV, PQ \\ buses}}^{N_b} |P_i^{cal} - P_i^{sch}| \quad (11)$$

$$F_Q = \sum_{\substack{i \in PQ \\ buses}}^{N_b} |Q_i^{cal} - Q_i^{sch}| \quad (12)$$

حال برای بهینه‌سازی مسئله پخش بار تابع هدف را به‌صورت زیر می‌توان تعریف کرد:

$$\text{Minimize} : \{f(v, \delta) = F_P^2 + F_Q^2\} \quad (13)$$

تابع هدف بایستی در حضور برخی قیدهای نامساوی بهینه شود. این قیدها برای دامنه ولتاژ و زاویه فاز ولتاژ در هر گره و توان راکتیو تولیدی در باس‌های PV در نظر گرفته می‌شوند.

$$|V_{i, \min}^{PQ}| < |V_i^{PQ}| < |V_{i, \max}^{PQ}| \quad (14)$$

$$\delta_{i, \min}^{PV, PQ} < \delta_i^{PV, PQ} < \delta_{i, \max}^{PV, PQ} \quad (15)$$

$$Q_{i, \min}^{G-PV} < Q_i^{G-PV} < Q_{i, \max}^{G-PV} \quad (16)$$

پارامترهای  $h$  و  $c$  به‌ترتیب نشان‌دهنده پارامترهای شکل و مقیاس برای سرعت باد  $v$  هستند. در این مقاله مقادیر  $h$  و  $c$  به‌ترتیب ۲ و ۹ در نظر گرفته می‌شوند.

در یک توربین بادی توان خروجی متأثر از سرعت باد بوده و یک رابطه غیرخطی بین این دو پارامتر وجود دارد. منحنی مشخصه "توان-سرعت" توربین‌های بادی، مقدار توان اکتیو تولیدی توربین بادی را به ازای سرعت‌های مختلف باد نشان می‌دهد و توسط رابطه زیر قابل بیان است [۲۲]:

$$P_{WT}(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \text{ or } v_{co} \leq v \\ P_{WT,r} \times \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{WT,r} & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (5)$$

$v_{ci}$ ،  $v_r$ ،  $v_{co}$  به‌ترتیب سرعت وصل، سرعت نامی و سرعت قطع باالا هستند.  $P_{WT,r}$  سرعت نامی توربین بادی است.

## ۴- مدل احتمالی توان تولیدی سیستم‌های

### خورشیدی

دو عامل مهمی که باعث ایجاد تغییرات و رفتار احتمالی در تولید توان سلول‌های خورشیدی هستند، میزان تابش اشعه خورشید و دمای محیط می‌باشند. برای تولید تابع توزیع احتمالی این پارامترها از چندتابع توزیع می‌توان بهره گرفت. در این مقاله از تابع توزیع نرمال برای مدل‌سازی پارامترهای مربوطه استفاده می‌شود.

بعدها مدل‌سازی تابش خورشید و دمای محیط با تابع توزیع احتمالی از رابطه زیر برای بدست آوردن میزان تولید توان خورشیدی در فرم تابع توزیع احتمالی استفاده می‌شود:

$$P_{pv} = P_{STC} \times \frac{G_{ING}}{G_{STC}} \times (1 + k_{\alpha}(T_c - T_r)) \quad (6)$$

میزان تابش خورشید و دمای محیط در شرایط استاندارد به‌ترتیب  $G_{ING} = 1000 \text{ W/m}^2$  و  $T_r = 25^\circ \text{ C}$  در نظر گرفته می‌شود. میزان تابش اشعه خورشید،  $T_c$  دمای پیرامون سلول و  $k_{\alpha}$  ضریب دما به ازای توان حداکثر.

## ۵- حل مسئله پخش بار احتمالی با الگوریتم

### هوشمند ICA

#### ۵-۱- فرمول‌بندی مسئله

در این بخش روشی مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند برای حل مسئله پخش بار ارائه می‌گردد. روش ارائه شده به‌دلیل وجود محدودیت‌های موجود در روش‌های کلاسیک در حضور منابع تولید پراکنده و در حضور شبکه‌های هوشمند معرفی می‌گردد. هدف از الگوریتم‌های

از آنجاکه داده‌های ورودی در این مقاله دارای رفتار احتمالی هستند، خروجی‌های مسئله نیز با عدم قطعیت همراه خواهد بود که در واقع می‌توان مسئله پخش بار احتمالی را بصورت زیر بیان کرد.

$$Y = h(X) \quad (17)$$

در مسئله پخش بار احتمالی ورودی‌های مسئله با  $X$  نشان داده می‌شوند و شامل توان‌های مصرفی در باس‌های  $PQ$  ( $P_1-PQ$  و  $Q_1-PQ$ )، توان اکتیو مصرفی در باسبارهای  $PV$  ( $P_1-PV$ )، میزان دامنه ولتاژ در باس‌های  $PV$  و اسلک ( $V_{slack}$  و  $|V_{PV}|$ ) و میزان زاویه فاز ولتاژ در باس اسلک ( $\delta_{slack}$ ) است:

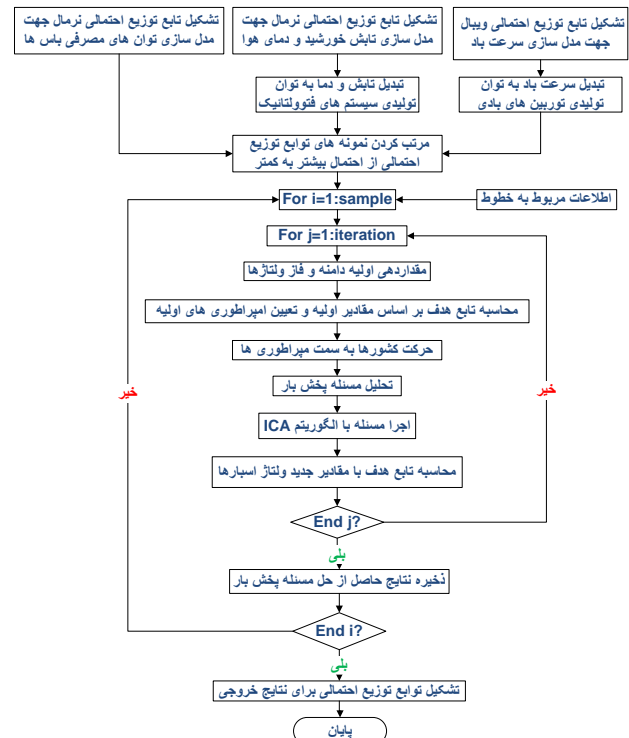
$$X = [P_1-PQ, Q_1-PQ, |V_{slack}|, |V_{PV}|, P_1-PV, \delta_{slack}]$$

نتایج خروجی با  $Y$  نشان داده شده و شامل توان‌های تولیدی باس اسلک ( $P_{G-slack}$  و  $Q_{G-slack}$ )، توان راکتیو تولیدی باس‌های  $PV$  ( $Q_{G-PV}$ )، دامنه ولتاژ باس‌های  $PQ$  ( $|V_{PQ}|$ ) و زاویه فاز ولتاژ باس‌های  $PQ$  و  $PV$  ( $\delta_{PQ}$  و  $\delta_{PV}$ ) است.

$$Y = [P_{G-slack}, Q_{G-slack}, Q_{G-PV}, |V_{slack}|, |V_{PQ}|, \delta_{PQ}, \delta_{PV}]$$

## ۲-۵- الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

در این مقاله، الگوریتم مطرح شده برای بهینه‌سازی، که از مدل‌سازی ریاضی رقابت امپریالیستی الهام گرفته شده است، معرفی شده و اجزای مختلف آن توضیح داده می‌شود. با داشتن تابع  $f(X)$  در بهینه‌سازی می‌خواهیم آرگومان  $X$  را به گونه‌ای بیابیم که هزینه متناظر آن بهینه باشد [۲۳].



شکل (۱): فلوجارت اجرای مسئله با روش ICA

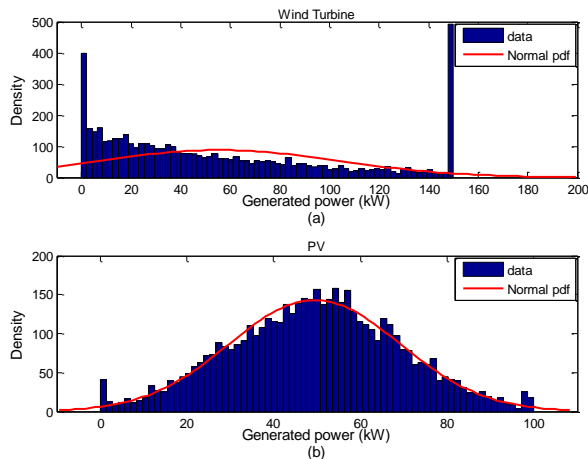
الگوریتم رقابت استعماری، همانند سایر روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، با تعدادی جمعیت اولیه شروع می‌شود. در این الگوریتم، هر عنصر

جمعیت، یک کشور نامیده می‌شود. کشورها به دو دسته مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند. هر استعمارگر، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه خود درآورده و آن‌ها را کنترل می‌کند. سیاست جذب و رقابت استعماری، هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل می‌دهند. در ارائه این الگوریتم، این سیاست با حرکت دادن مستعمرات یک امپراطوری، مطابق یک رابطه خاص صورت می‌پذیرد. با شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن‌ها شروع می‌شود. هر امپراطوری‌ای که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری، حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری‌های رقیب، و به سيطرة در آوردن آن‌ها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگتر افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف‌تر، حذف خواهند شد. امپراطوری‌ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند. با گذشت زمان، مستعمرات، از لحاظ قدرت به امپراطوری‌ها نزدیک‌تر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی خواهیم بود. حد نهایی رقابت استعماری زمانی است که یک امپراطوری واحد در دنیا داشته باشیم، با مستمراتی که از لحاظ موقعیت، به خود کشور امپریالیست، خیلی نزدیک هستند. در شکل (۱)، فلوجارت مربوط به اجرای مسئله پخش بار احتمالی با روش ارائه شده نشان داده شده است.

## ۶- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش یک شبکه توزیع شعاعی-حلقوی ۳۳-باسه با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده بررسی می‌شود. در این شبکه از دو توربین بادی هرکدام به ظرفیت نامی ۱۵۰ KW و دو سیستم خورشیدی با ظرفیت نامی ۱۰۰ KW استفاده شده است. البته قابل ذکر است که این ظرفیت‌ها حداکثر مقدار توان قابل تولید توسط همین واحدها هستند. شکل (۷-۴) که شبکه مورد مطالعه را نشان می‌دهد، ۵ خط به شبکه اضافه شده‌اند. خطوط ۹-۱۵، ۱۸-۳۳، ۲۱-۸، ۲۲-۱۲ و ۲۵-۲۹ که با خط چین مشخص شده‌اند، باعث تبدیل شبکه شعاعی به شبکه حلقوی ضعیف شده‌اند. از طرفی منابع انرژی تجدیدپذیر نیز در شبکه مشاهده می‌شوند که توربین‌های بادی به باس‌های ۱۶ و ۳۰ و سیستم‌های فتوولتائیک به باس‌های ۲۲ و ۲۴ متصل هستند.

اطلاعات مربوط به خطوط و باسها در [۲۴] بیان شده است. مقادیر مربوط به توانهای مصرفی در این مرجع به عنوان مقادیر میانگین در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۲) دیگرام تکخطی شبکه مورد مطالعه را که از استانداردهای IEEE است، نشان می‌دهد. تعداد نمونه‌هایی که در مدل‌سازی بارهای مصرفی و منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده است، برابر ۵۰۰۰ نمونه است. در مدل‌سازی تمامی این نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. این نمونه‌ها



شکل (۴): تابع توزیع احتمالی توان‌های تولیدی

(a): توان تولیدی توربین بادی. (b): توان تولیدی سیستم خورشیدی.  
جدول (3): اندازه دامنه ولتاژ باس‌ها براساس مقدار میانگین و انحراف

معیار در حضور منابع تجدیدپذیر

باس	دامنه ولتاژ باس‌ها در حضور منابع تولید پراکنده			
	مقدار انحراف معیار		مقدار میانگین	
	ICA	MCS	ICA	MCS
1	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000
2	0.9955	0.9955	0.0002	0.0002
3	0.9795	0.9795	0.0009	0.0009
4	0.9753	0.9753	0.0012	0.0012
5	0.9714	0.9715	0.0016	0.0016
6	0.9636	0.9636	0.0027	0.0027
7	0.9619	0.9619	0.0026	0.0026
8	0.9584	0.9584	0.0024	0.0025
9	0.9550	0.9551	0.0028	0.0028
10	0.9545	0.9545	0.0027	0.0027
11	0.9546	0.9547	0.0027	0.0027
12	0.9551	0.9551	0.0027	0.0027
13	0.9549	0.9549	0.0036	0.0036
14	0.9560	0.9560	0.0041	0.0041
15	0.9578	0.9578	0.0046	0.0045
16	0.9588	0.9588	0.0055	0.0055
17	0.9543	0.9543	0.0060	0.0060
18	0.9527	0.9528	0.0061	0.0061
19	0.9924	0.9924	0.0003	0.0003
20	0.9669	0.9669	0.0015	0.0015
21	0.9596	0.9596	0.0018	0.0019
22	0.9505	0.9505	0.0026	0.0027
23	0.9698	0.9698	0.0014	0.0015
24	0.9505	0.9505	0.0028	0.0028
25	0.9457	0.9457	0.0029	0.0029
26	0.9628	0.9628	0.0029	0.0029
27	0.9618	0.9619	0.0032	0.0032
28	0.9598	0.9598	0.0049	0.0048
29	0.9589	0.9589	0.0062	0.0061
30	0.9584	0.9584	0.0072	0.0072
31	0.9529	0.9529	0.0071	0.0070
32	0.9517	0.9518	0.0070	0.0070
33	0.9517	0.9517	0.0069	0.0068

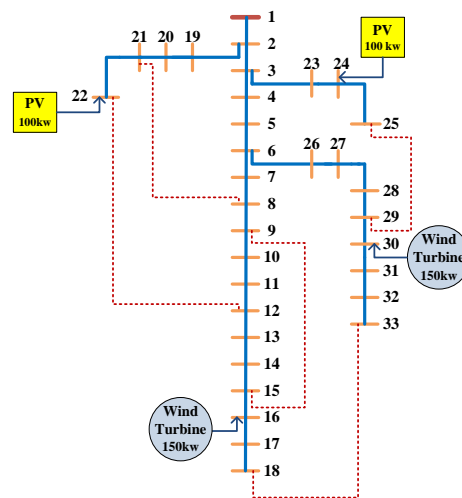
در جدول (3) نتایج حاصل از روش ارائه شده مبتنی بر الگوریتم ICA با روش شبیه سازی مونت کارلو (MCS) مقایسه شده است. پروفیل ولتاژ

در بازه زمانی مشخصی نمونه برداری می شوند. مقادیر پارامترهای مربوط به الگوریتم ICA به صورت جدول زیر در نظر گرفته می شود:

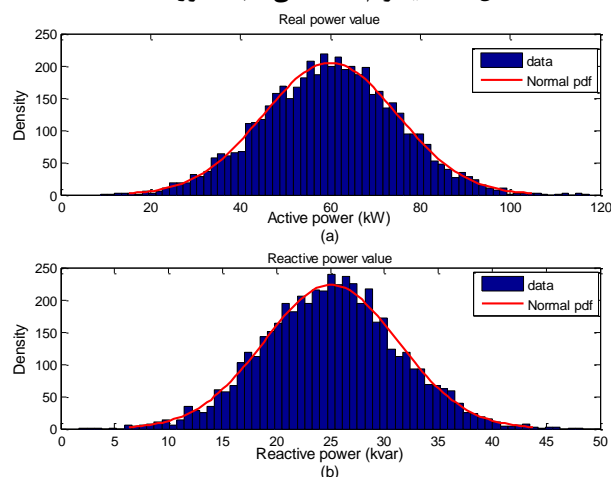
جدول (۱): مقادیر پارامترهای ICA

تعداد تکرار یا دهه	تعداد کشورهای اولیه	تعداد امپراطوری‌های اولیه	تعداد مستعمرات
۱۰۰	۸۰	۱۰	۷۰

در شکل (۳) تابع توزیع احتمالی توان‌های حقیقی و راکتیو در باس ۲۷ نشان داده شده است. در این شکل‌ها محور عمودی تعداد تکرارها یا density هر حالت احتمالی از توان مربوطه در باس موردنظر را بیان می کند.



شکل (۲): دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه



شکل (۳): تابع توزیع احتمالی توان‌های مصرفی در باس ۲۷

(a): توان اکتیو مصرفی باس ۲۷. (b): توان راکتیو مصرفی باس ۲۷.

مقادیر مربوط به پارامترهای توربین های بادی و سلول های خورشیدی در جدول (2) بیان شده اند:

جدول (2): مقادیر پارامترهای مربوط به توربین بادی و سیستم خورشیدی

WT	$V_{ci}=2m/s$	$V_r=14m/s$	$V_{co}=25m/s$	$h=2$
PV	$P_{stc}=100kw$	$K_a=0.001$		$c=9$



مجموع احتمالات تمام حالات ممکنه برای دامنه ولتاژ در تک تک باس‌ها بایستی برابر عدد ۱ بشود.

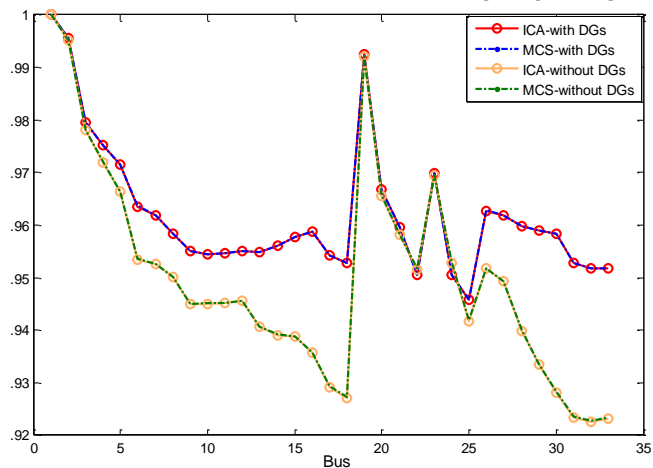
تابع توزیع احتمالی برای زاویه فاز ولتاژ باس ۲۷ را برای هر دو سناریو می‌توان به صورت شکل (۷) نشان داد. براساس نتایج بدست آمده از حل مسئله پخش بار احتمالی که تمام نتایج از جمله دامنه ولتاژ و زاویه فاز ولتاژ دارای تابع توزیع احتمالی هستند، شارش توان‌ها در خطوط نیز دارای رفتار احتمالی بوده و بایستی در فرم PDF بیان شوند. برای نمونه شارش توان‌ها در خطوط شبکه براساس مقدار میانگین در حضور منابع DG در جدول (۴) بیان شده‌اند.

جدول (۴): شارش توان در خطوط براساس مقدار میانگین در حضور

#### منابع تجدیدپذیر

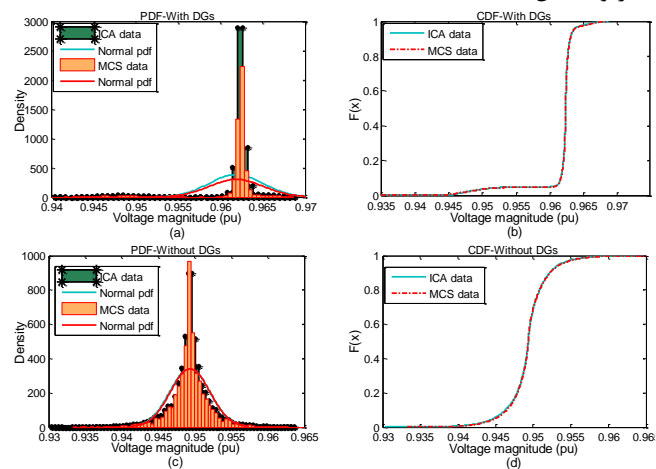
From bus	To bus	Power flow through lines with DGs (kW/kvar)			
		of real power $\mu$ (kW)		of reactive $\mu$ power (kvar)	
		ICA	MCS	ICA	MCS
1	2	3690.00	3690.12	2310.00	2310.06
2	3	2510.00	2510.21	1410.00	1410.04
2	19	1060.00	1060.09	840.00	840.07
3	4	1040.00	1040.16	210.00	210.41
3	23	1340.00	1340.14	1130.00	1130.12
4	5	910.00	910.42	130.00	130.14
5	6	850.00	850.31	100.00	100.45
6	7	350.00	350.12	160.00	160.12
6	26	430.00	430.23	-90.00	-90.12
7	8	150.00	150.11	60.00	60.31
8	9	300.00	300.03	20.00	20.14
9	10	-350.00	-350.40	-60.00	-60.45
9	15	-40.00	-40.13	130.00	130.13
10	11	280.00	280.24	-130.00	-130.21
11	12	-100.00	-100.19	110.00	110.14
12	13	-150.00	-150.36	80.00	80.09
12	22	160.00	160.10	-180.00	-180.14
13	14	-360.00	-360.09	220.00	220.14
14	15	100.00	100.17	-220.00	-220.34
15	16	-20.00	-20.26	-300.00	-300.43
16	17	200.00	200.31	-440.00	-440.51
17	18	190.00	190.11	110.00	110.19
18	33	130.00	130.13	90.00	90.13
19	20	40.00	40.14	50.00	50.10
20	21	970.00	970.43	790.00	790.24
21	8	860.00	860.20	730.00	730.36
21	22	410.00	410.06	630.00	630.45
23	24	1230.00	1230.54	1070.00	1070.46
24	25	840.00	840.12	-410.00	-410.31
25	29	410.00	410.16	-620.00	-620.10
26	27	370.00	370.20	-110.00	-110.13
27	28	310.00	310.34	-140.00	-140.24
28	29	250.00	250.12	-160.00	-160.16
29	30	530.00	540.11	-860.00	-870.34
30	31	380.00	390.08	160.00	160.18
31	32	230.00	230.12	90.00	90.11
32	33	20.00	20.01	-10.00	-10.01

را می‌توان برای دو سناریو مختلف با دو روش در شکل (۵) برحسب مقدار میانگین نشان داد:



شکل (۵): مقایسه پروفیل ولتاژ شبکه بر حسب مقادیر میانگین

تا بحال تمام نتایج به دست آمده براساس مقادیر میانگین بیان شده‌اند. حال می‌خواهیم تعدادی از نتایج به دست را براساس تابع توزیع احتمالی (PDF) و تابع توزیع تجمعی (CDF) نشان دهیم. در تابع توزیع احتمالی، تمام حالات ممکن برای پارامتر مورد استفاده برحسب میزان احتمال وقوع آن حالت یا براساس تعداد تکرار و یا چگالی آن بیان می‌شود. در شکل (۶) PDF و CDF دامنه ولتاژ باس ۲۷ در دو سناریو نمایش داده شده است.



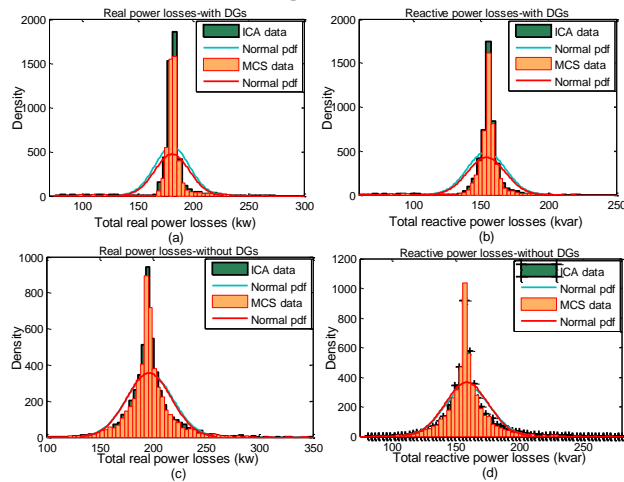
شکل (۶): توابع توزیع احتمالی و تجمعی دامنه ولتاژ باس ۲۷ در دو

#### سناریو

- (a): تابع توزیع احتمالی دامنه ولتاژ باس ۲۷ در حضور تولیدات پراکنده.
- (b): تابع توزیع تجمعی دامنه ولتاژ باس ۲۷ در حضور تولیدات پراکنده.
- (c): تابع توزیع احتمالی دامنه ولتاژ باس ۲۷ بدون تولیدات پراکنده.
- (d): تابع توزیع تجمعی دامنه ولتاژ باس ۲۷ بدون تولیدات پراکنده.

همانطور که از شکل (۶) مشاهده می‌شود، مقدار میانگین دامنه ولتاژ در حضور تولیدات پراکنده بیشتر از حالت بدون حضور منابع تولید پراکنده است که دلیل این امر تزریق توان اکتیو به شبکه می‌باشد. در این شکل تابع توزیع تجمعی در هر حالت نشان داده شده است.

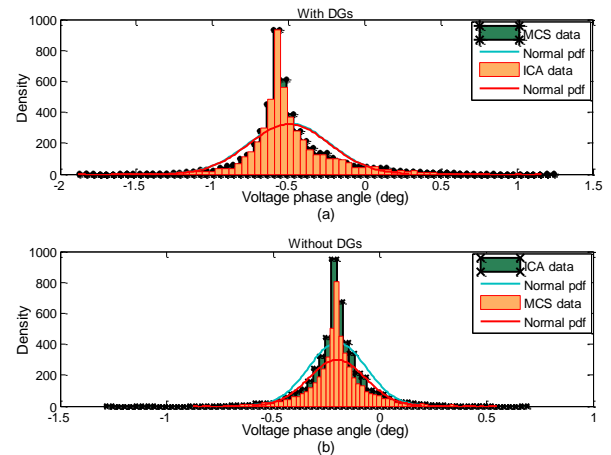
عبوری از خط موردنظر در حضور منابع تجدیدپذیر وجود دارد، بیانگر ارتباط دوطرفه در شبکه فعال مورد مطالعه است. یکی از مزایای این شبکه‌ها کاهش تلفات شبکه نسبت به حالت بدون حضور منابع تولید پراکنده است که در شکل (۹) دیده می‌شود.



شکل (۹): تابع توزیع احتمالی تلفات کل شبکه در دو سناریو (a): تلفات توان اکتیو شبکه در حضور تولیدات پراکنده. (b): تلفات توان راکتیو شبکه در حضور تولیدات پراکنده. (c): تلفات توان اکتیو شبکه بدون تولیدات پراکنده. (d): تلفات توان راکتیو شبکه بدون تولیدات پراکنده

برتری‌ها و مزیت‌های روش ارائه شده نسبت به روش مونت کارلو را می‌توان در ۳ مورد بیان نمود:

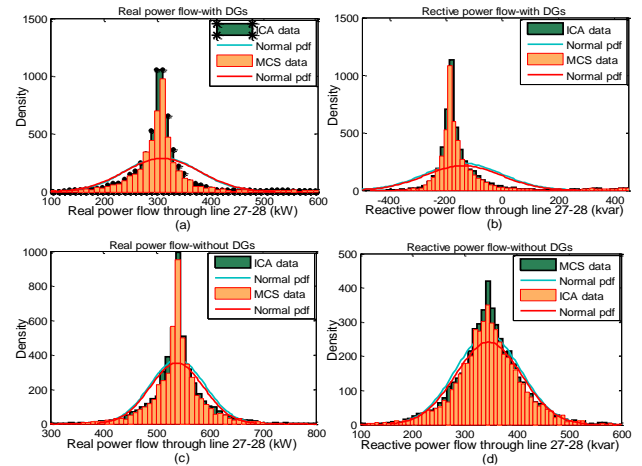
- در روش ارائه شده، در هر تکرار مسئله پخش بار با الگوریتم‌های هوشمند حل می‌شود و مسئله به صورت یک تابع بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود که هدف کمینه‌سازی تفاضل توان‌های محاسبه شده و برنامه‌ریزی شده می‌باشد. بنابراین فرمول بندی مسئله با استفاده از روش ارائه شده در مقاله بسیار ساده و بدون پیچیدگی ولی با دقت اجرای بسیار بالا است. در این روش نیازی به محاسبات پیچیده ماتریس ژاکوبین نیست.
- با توجه به نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر به چرخه تولید توان و با توجه به بالا رفتن نرخ R/X در شبکه‌های قدرت، استفاده از روش‌های کلاسیک دچار مشکل واگرایی می‌شوند. به عنوان مثال روش نیوتن-رافسون در شبکه‌های حلقوی کاربرد دارد و در شبکه‌های شعاعی-حلقوی یا شعاعی به مشکل برمی‌خورد. روش جاروب پسر و پیشرو نیز در شبکه‌های شعاعی کاربرد دارد. ولی روش مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند قادر به حل مسئله در تمامی شبکه‌های قدرت اعم از شعاعی و شعاعی-حلقوی می‌باشد.
- زمان اجرای مسئله با ICA تفاوت چشمگیری با روش مونت کارلو دارد. دلیل این امر را می‌توان به سادگی برنامه‌نویسی مسئله با الگوریتم‌های هوشمند اشاره کرد. در روش مونت کارلو برای رسیدن به جواب‌های دقیق‌تر نیاز به



شکل (۷): تابع توزیع احتمالی زاویه فاز ولتاژ باس ۲۷ در دو سناریو (a): زاویه فاز ولتاژ باس ۲۷ در حضور تولیدات پراکنده. (b): زاویه فاز ولتاژ باس ۲۷ بدون تولیدات پراکنده

در شکل (۷) مشاهده می‌شود که زاویه فاز ولتاژی باس مربوطه دارای تابع توزیع نرمال است. مقایسه PDF حاصل از روش ارائه شده با روش مونت کارلو دقت محاسبات الگوریتم ICA را نشان می‌دهد.

در شکل (۸) تابع توزیع احتمالی توان‌های عبوری از باس ۲۷ به باس ۲۸ در دو سناریو در فرم PDF نشان داده شده است. همچنین میزان کل تلفات شبکه برای توان‌های اکتیو و راکتیو به صورت تابع توزیع احتمالی در شکل (۹) مشاهده می‌شود.



شکل (۸): تابع توزیع احتمالی شارش توان‌ها از باس ۲۷ به باس ۲۸ (a): شارش توان اکتیو در حضور تولیدات پراکنده. (b): شارش توان راکتیو در حضور تولیدات پراکنده. (c): شارش توان اکتیو بدون تولیدات پراکنده. (d): شارش توان راکتیو بدون تولیدات پراکنده.

باتوجه به شکل (۸) با نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، مقدار شارش توان در خط ۲۷ به ۲۸ کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که شبکه مورد مطالعه در این مقاله یک شبکه فعال در نظر گرفته شده است، یعنی در برخی از باس‌های شبکه علاوه بر مصرف توان، شاهد تولید توان نیز هستیم. پس در اینگونه شبکه‌ها علاوه بر شبکه بالادستی، منابع تولید پراکنده نیز در تامین توان مصرفی سایر باس‌ها نقش دارند. در نتیجه یک ارتباط دوطرفه در خطوط شبکه توزیع ایجاد خواهد شد. بنابراین مقادیر منفی که در توان راکتیو

Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS: 1-6, 2006.

- [8] Gupta, N., Pant, V., & Das, B. "Probabilistic load flow incorporating generator reactive power limit violations with spline based reconstruction method", *Electric Power Systems Research*, Vol. 106, pp. 203–213, 2014.
- [9] Mohammadi, M., Shayegani, A., Adaminejad, H. "A new approach of point estimate method for probabilistic load flow", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 51, pp. 54–60, 2013.
- [10] Villanueva, D., Feijóo, AE., Pazos, JL. "An analytical method to solve the probabilistic load flow considering load demand correlation using the DC load flow", *Electric Power Systems Research*, Vol. 110, pp.1-8, 2014.
- [11] Xiao, Q. "Comparing three methods for solving probabilistic optimal power flow", *Electric Power Systems Research*, Vol. 124, pp.92-99, 2015.
- [12] Aien, M., Fotuhi-Firuzabad, M., Rashidinejad, M. "Probabilistic optimal power flow in correlated hybrid wind-photovoltaic power systems", *IEEE Trans. Smart Grids*, Vol. 5, No. 1, pp. 130-138, 2014.
- [13] Cai, D., Shi, D., Chen, J. "Probabilistic load flow with correlated input random variables using uniform design sampling", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 63, pp. 105–112, 2014.
- [14] Pourahmadi-Nakhli, M., Seifi, A., Taghavi, R. "A nonlinear-hybrid fuzzy/probabilistic load flow for radial distribution systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 47, pp. 69–77, 2013.
- [15] Alizadeh, S. Saeedmanesh, M. Rahimi-Kian, A. Jalalabadi, E. "Real-Time Frequency and Voltage Control of an Islanded Mode Microgrid", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, Vol.12, No.3, pp. 13-18, 2015.
- [16] Golizadeh, R. Najafi-Ravadanegh, S. "On DC-Segmentation of Interconnected Power Systems", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, Vol.12, No.3, pp. 47-54, 2015.
- [17] Nikmehr, N. Najafi-Ravadanegh, S. "Optimal Power Dispatch of Multi-Microgrids at Future Smart Distribution Grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 6, No. 4, pp. 1648 - 1657, 2015.
- [18] Nikmehr, N. Najafi-Ravadanegh, S. "Reliability evaluation of multi-microgrids considering optimal operation of small scale energy zones under load-generation uncertainties," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 78, pp. 80-87, 2016.
- [19] Seppala A. Load research and load estimation in electricity distribution, Ph.D. Thesis, Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland; November 1996.
- [20] Billinton, R. Huang, D., "Effects of load forecast uncertainty on bulk electric system reliability evaluation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 418-425, 2008.
- [21] Nikmehr, N. Najafi-Ravadanegh, S. "Heuristic probabilistic power flow algorithm for microgrids operation and planning," *IET Gener. Transm. Distrib*, Vol. 9, No. 11, pp. 985 - 995, 2015.
- [22] Slootweg, J.G., de Haan, S.W.H., Polinder, H., Kling, W.L. "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 18, No. 1, pp. 144-151, 2003.
- [23] Atashpaz, E., Lucas, C. "Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", *Proc. IEEE. Congress on*

نمونه‌های بیشتر است که با بالا رفتن نمونه‌ها زمان اجرا نیز بیشتر می‌شود. جدول (۵) زمان اجرای هردو روش را باهم مقایسه می‌نماید:

جدول (۴): مقایسه زمان اجرای مسئله پخش بار احتمالی در دو روش

روش حل مسئله	روش ارائه شده	روش مونت کارلو
زمان اجرا (ثانیه)	۳۶۱	۳۶۸۹

## ۷- نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین مطالعات در سیستم‌های قدرت برای شناساندن رفتار سیستم، مطالعات پخش بار می‌باشد. با توجه به رشد روزافزون منابع تولید پراکنده از یک‌طرف و مفهوم شبکه‌های هوشمند که شبکه‌های نسل آینده برق محسوب می‌شوند، از طرف دیگر باعث تغییر نگرش در حل این مسئله بسیار مهم و اساسی در محیط قطعی و بدون در نظر گرفتن رفتارهای احتمالی پارامترهای شبکه شده است. رفتارهای احتمالی تولید توان توسط منابع DG و همچنین با توجه به عدم قطعیت در مصرف توان در سمت مشتریان، مسئله پخش بار معمولی دیگر نمی‌تواند جواب گوی نیازهای اساسی شبکه باشد. در این مقاله از الگوریتم ICA برای حل مسئله استفاده شده است. مسئله پخش بار احتمالی علاوه بر روش ارائه شده با روش مونت کارلو نیز حل شده است. علت این امر مقایسه نتایج هر دو روش می‌باشد. روش مونت کارلو که یک روش جامع و دقیق برای حل مسائل احتمالاتی است، در بسیاری از تحقیقات برای حل مسئله به‌کار رفته است. با مقایسه نتایج حاصل از روش MCS با روش ICA دقت و صحت روش ارائه شده مشاهده می‌شود.

## مراجع

- [1] Morales, JM., Baringo, L., Conejo, AJ., Minguez, R. "Probabilistic power flow with correlated wind sources", *IET Generation Transmission Distribution*, Vol. 4, pp. 641-51, 2010.
- [2] Borkowska, B. "Probabilistic load flow", *IEEE Trans. Power App. Syst*, Vol. PAS-93, pp. 752–759, 1974.
- [3] Allan, RN., Al-Shakarchi, MRG. "Linear dependence between nodal powers in probabilistic a.c. load flow", *Proc IEE*, Vol. 124, No. 6, pp. 529–34, 1977.
- [4] Ruiz-Rodríguez, FJ., Jurado, F., Kamel, S. "Application of probabilistic three-phase load flow for electrical distribution systems with photovoltaic generators", *Przeglad Elektrotechniczny*, Vol. 88, No. 7, pp. 38–42, 2012.
- [5] Hatziaargyriou, ND., Karakatsanis, TS., Lorentzou, MI. "Voltage control settings to increase wind power based on probabilistic load flow", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 27, pp. 656-61, 2005.
- [6] Su, C. L. "Distribution probabilistic load flow solution considering network reconfiguration and voltage control devices," *15th Power Systems Computation Conference*, Liege, Aug. 2005.
- [7] Verbic, G., Schellenberg, A., Rosehart, W., Canizares, C. A., "Probabilistic optimal power flow applications to electricity markets", *International Conference on*

Evolutionary Computation, Singapore, pp. 4661-4667, 2007.

- [24] Venkatesh, B., Ranjan, R., Gooi, H.B. 'optimal reconfiguration of radial distribution systems to maximize loadability", IEEE Trans. Power syst, Vol. 19, No. 1, pp. 260-266, 2004.

