

# جبران سازی توان راکتیو با استفاده از تخصیص بهینه خازن‌ها در شبکه توزیع در حضور نیروگاه بادی مبتنی بر تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی

محبوبه اعتمادی‌زاده و مریم رضانی

دیدگاه‌های متفاوتی بررسی نمود. این دیدگاه‌ها عبارتند از روش بهینه‌سازی، اجزای تابع هدف، مدل‌سازی عدم قطعیت، لحاظ کردن منابع تولید پراکنده مرسوم و تجدیدپذیر و تعداد تابع هدف.

تا کنون مطالعات متنوعی در این زمینه انجام شده و روش‌های گوناگونی برای حل مسئله جایابی خازن‌ها در مراجع مختلف پیشنهاد شده است که به صورت کلی به دسته‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۲]: روش‌های تحلیلی [۳]، برنامه‌ریزی عددی [۴]، روش‌های ابتکاری [۵] و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی. روش‌های ابتکاری شامل الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) [۶]، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) [۷]، الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS) [۸]، الگوریتم شبیه‌سازی رشد گیاه (PGSA) [۹]، الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA) [۱۰]، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) [۱۱]، الگوریتم جستجوی کلاغ‌ها (CSA) [۱۲]، الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABC) [۱۳]، الگوریتم کلونی مورچگان (ACO) [۱۴] و الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) [۱۵].

مکان و ظرفیت بهینه خازن‌های ثابت در شبکه‌های توزیع با توجه به اهداف مختلف در مقالات حاصل شده است. این اهداف عبارتند از کاهش تلفات توان، کاهش تلفات انرژی، بهبود ضریب توان، بهبود پروفیل ولتاژ و آزادسازی ظرفیت خطوط [۱۵] تا [۲۳]. در [۲۱] و [۲۲] تعیین مکان و ظرفیت بهینه خازن‌ها در شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ انجام شده است. در این مراجع هزینه تلفات توان و هزینه خازن‌ها به عنوان پارامترهای مؤثر در تابع هدف در نظر گرفته شده است. تابع هدف مورد استفاده در [۲۰] و [۲۳] شامل هزینه تلفات توان، هزینه تلفات انرژی و هزینه خازن‌ها در شبکه توزیع می‌باشد.

بسیاری از مطالعات به حل مسئله بدون توجه به عدم قطعیت پارامترها پرداخته‌اند [۱۵] تا [۲۲] و در برخی از مقالات به این نکته توجه شده است [۲۴] تا [۲۶]. در [۲۴] تعیین مکان و ظرفیت بهینه خازن‌ها در شبکه توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت در بار انجام شده است. در این مقاله از روش اینترول<sup>۱</sup> و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. در [۲۶] جایابی خازن‌ها در شبکه توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت در بار و توربین بادی انجام شده است. تابع هدف مورد استفاده در این مقاله شامل هزینه تلفات توان، هزینه تلفات انرژی و هزینه خازن‌ها می‌باشد و در این مقاله از الگوریتم ازدحام ذرات

چکیده: وجود پارامترهای نامطمئن در سیستم قدرت چالش‌های فراوانی را برای طراحان و بهره‌برداران این سیستم ایجاد کرده است که از آن جمله می‌توان به مسئله خازن‌گذاری در حضور نیروگاه‌های بادی اشاره کرد. پاسخ مسئله به مقدار بار و خروجی نیروگاه بادی وابسته است که مقادیری نامطمئن دارند. در این مقاله، از روش تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی برای مدل‌سازی عدم قطعیت در بار شبکه و خروجی نیروگاه بادی استفاده می‌شود. تابع هدف شامل هزینه بانک‌های خازنی و تلفات انرژی است که برای محاسبه تلفات انرژی از پخش بار مبتنی بر تبدیل بی‌بو استفاده شده است. پاسخ بهینه مسئله خازن‌گذاری بر اساس الگوریتم ژنتیک حاصل می‌شود. در نهایت کارایی روش بیان شده با انجام مطالعات عددی بر روی شبکه ۳۳ شینه IEEE مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه: پخش بار احتمالی، تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی، جایابی بهینه خازن، عدم قطعیت، نیروگاه بادی.

## ۱- مقدمه

شبکه توزیع به دلیل پایین بودن سطح ولتاژ و در نتیجه زیاد بودن مقدار جریان، سهم قابل توجهی از تلفات سیستم قدرت را به خود اختصاص داده است. مطالعات نشان می‌دهد که حدود ۱۳٪ از توان تولیدشده در سیستم قدرت به صورت تلفات اهمی در بخش توزیع تلف می‌گردد [۱]. از این رو همواره کاهش تلفات شبکه توزیع یکی از اهداف مهم سیستم قدرت بوده است. روش‌های مختلفی برای کاهش تلفات در سیستم‌های توزیع وجود دارد که از آن جمله می‌توان به نصب منابع تولید پراکنده، تغییر نوع هادی‌ها و خازن‌گذاری اشاره کرد. یکی از روش‌های مؤثر و مفید به منظور تنظیم سطح ولتاژ، کاهش تلفات انرژی، اصلاح ضریب توان و آزادسازی ظرفیت سیستم در شبکه‌های توزیع، استفاده از خازن‌های شنت می‌باشد. خازن‌گذاری بهینه شامل تعیین مکان، اندازه و تعداد خازن‌های نصب‌شده در سیستم توزیع است به طوری که بیشترین سود با در نظر گرفتن سطوح مختلف بار به دست آید. مطالعات ارائه‌شده در مورد تعیین مکان و ظرفیت نصب خازن‌های ثابت در شبکه توزیع را می‌توان از

این مقاله در تاریخ ۱۰ آذر ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۷ مرداد ماه ۱۳۹۹ بازنگری شد. این تحقیق توسط وزارت نیرو بر اساس قرارداد شماره ۱۳۵۷ پشتیبانی شده است. محبوبه اعتمادی‌زاده، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، (email: m.etemadzade@gmail.com).

مریم رضانی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، (email: mramezani@birjand.ac.ir).

1. Interval

2. Particle Swarm Optimization

هدف دو استراتژی ریسک‌گریز  $(RA)^6$  و ریسک‌پذیر  $(RS)^7$  پیاده‌سازی می‌شود. تابع هدف شامل هزینه تلفات انرژی و هزینه نصب خازن‌ها است. برای بهینه‌سازی مسئله فوق از الگوریتم ژنتیک  $(GA)^8$  استفاده می‌شود. همچنین برای محاسبه تلفات انرژی با توجه به وجود غیر قطعی بودن خروجی نیروگاه بادی و بار شبکه، از پخش بار احتمالی مبتنی بر تبدیل بی‌بوی متعارف  $(CUT)^9$  استفاده شده است. الگوریتم‌های مبتنی بر تبدیل تبدیل بی‌بوی نسبت به روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی از قبیل روش شبیه‌سازی مونت کارلو از سرعت بالاتری برخوردار هستند و ضمن دارابودن دقت مناسب، توانایی مدل‌سازی همبستگی بین متغیرهای تصادفی را دارند.

در ادامه ابتدا، در بخش دوم به مدل‌سازی عدم قطعیت در توربین بادی پرداخته خواهد شد. اصول روش احتمالاتی تبدیل بی‌بوی متعارف در بخش سوم شرح داده خواهد شد. در بخش چهارم مدل تابع هدف پیشنهادی و قیود شبکه معرفی خواهد شد. بخش پنجم و ششم به ارائه اصول روش IGDT و پیاده‌سازی روش IGDT بر روی مسئله اختصاص خواهد داشت. در بخش هفتم به ارائه نتایج شبیه‌سازی پرداخته خواهد شد و نهایتاً بخش هشتم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از مقاله خواهد پرداخت.

## ۲- مدل‌سازی عدم قطعیت در توربین بادی

توربین بادی انرژی جنبشی باد را به انرژی مکانیکی بر روی شفت تبدیل کرده و ژنراتور انرژی مکانیکی شفت را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. توان خروجی یک توربین بادی به سرعت باد و مشخصه توربین‌های بادی وابسته است [۳۶]. از آنجایی که سرعت باد به صورت تصادفی تغییر می‌کند، موضوع عدم قطعیت در توان خروجی توربین بادی مطرح می‌شود. بنابراین ابتدا باید سرعت باد در منطقه مورد مطالعه مشخص و مدل توربین بادی تعیین شود.

توان خروجی یک توربین بادی متأثر از سرعت باد بوده و یک رابطه غیر خطی بین این دو پارامتر وجود دارد. این مشخصه توسط (۱) بیان شده است. در این رابطه  $v$  سرعت باد،  $P(v)$  توان خروجی توربین بادی و  $v_{ci}$  سرعت بادی است که توربین بادی در آن شروع به کار می‌کند. توان تولیدی توربین در سرعت نامی  $v_r$  به مقدار نامی  $P_{v,r}$  می‌رسد و در سرعت  $v_{co}$  به دلیل حفظ امنیت، توربین بادی متوقف می‌شود

$$P(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ P_{v,r} \left( \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} \right)^3 & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{v,r} & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

## ۳- پخش بار احتمالی مبتنی بر تبدیل بی‌بوی

سیستم‌های قدرت به صورت ذاتی غیر قطعی هستند و از این رو برای مواجهه با داده‌های تصادفی نیاز به ابزارهای احتمالاتی است. استفاده از پخش بار قطعی به دلیل غیر قطعی بودن بار شبکه و تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر برای ارزیابی شبکه توزیع کارآمد نیست، لذا از ابزارهای احتمالی پخش بار به این منظور استفاده می‌شود. تا کنون روش‌های

الگوریتم تکاملی تفاضلی  $(DE)^1$  برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. همچنین از سری زمانی آرما و تخمین دوطرفه‌ای  $(PEM)^2$  برای شبیه‌سازی سرعت باد و عملکرد احتمالی پخش بار استفاده شده است. در چند دهه اخیر با افزایش مشکلات زیست‌محیطی و افزایش حساسیت‌های اجتماعی، تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر رشد چشم‌گیری داشته است. در [۲۷] تا [۲۹] تعیین مکان و ظرفیت بهینه خازن‌ها در شبکه توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده انجام شده است. در [۲۷] تعیین مکان و ظرفیت بهینه خازن‌ها در شبکه توزیع با در نظر گرفتن واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر از قبیل نیروگاه‌های بادی و خورشیدی انجام شده است. در این مقاله از روش شبیه‌سازی مونت کارلو  $(MCS)^3$  برای مدل‌سازی عدم قطعیت در خروجی منابع تولید پراکنده و بار شبکه استفاده شده است. از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات  $(PSO)$  برای جایابی خازن در شبکه توزیع با در نظر گرفتن ژنراتور توربین‌های بادی در [۲۹] استفاده شده است.

تعیین مکان و ظرفیت بهینه خازن‌ها در شبکه توزیع می‌تواند به صورت چندهدفه نیز مدل‌سازی شود [۳۰] و [۳۱]. در [۳۰] از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای تعیین مکان و ظرفیت بهینه خازن‌ها در شبکه‌های توزیع نامتعادل و هارمونیکی استفاده شده است. اجزای تابع هدف در نظر گرفته شده در این مقاله شامل هزینه خازن‌ها، شاخص عدم تعادل شبکه و سطح اعوجاج هارمونیکی کل می‌باشد.

مرور مختصر ارائه‌شده در مورد مسئله خازن‌گذاری نشان می‌دهد که تعیین مکان و ظرفیت بهینه خازن‌های ثابت در شبکه توزیع بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت در منابع انرژی تجدیدپذیر و بار انجام شده است. مقالاتی که عدم قطعیت را مدل کرده‌اند، از روش‌هایی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی (سناریو بیان)  $(SB)$  استفاده کرده‌اند که این روش‌ها نیاز به اطلاعات زیادی از پارامترهای غیر قطعی شبکه دارد که این اطلاعات یا عموماً در دسترس نیستند و یا الگوی رفتاری آنها دائماً در حال تغییر است.

در این مقاله تعیین مکان و ظرفیت بهینه خازن‌ها در شبکه توزیع دارای نیروگاه بادی مطرح شده و عدم قطعیت در تولید توان نیروگاه بادی و بار شبکه با استفاده از روش  $(IGDT)^4$  مدل شده است. تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی  $(IGDT)$  یکی از روش‌های پرکاربرد برای مدل‌سازی عدم قطعیت است. در [۳۲] از  $(IGDT)$  برای حل مسئله پخش بار بهینه با در نظر گرفتن عدم قطعیت انرژی باد استفاده شده است. در [۳۳] از  $(IGDT)$  به منظور برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال از دید بهره‌بردار شبکه و با هدف حداقل کردن هزینه احداث خطوط استفاده شده است. در [۳۴] از  $(IGDT)$  برای حل مسئله توزیع اقتصادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در انرژی باد و پاسخ تقاضا استفاده شده است. از  $(IGDT)$  برای بهره‌برداری بهینه پارکینگ خودروهای برقی و به دست آوردن منحنی مناقصه بهینه برای شرکت در بازار برق با در نظر گرفتن عدم قطعیت در قیمت توان در [۳۵] استفاده شده است.

در روش  $(IGDT)$  با در نظر گرفتن یک مدل مقاوم، ابتدا مقدار پایه تابع هدف محاسبه می‌شود و سپس در مرحله بعد، با توجه به مقدار پایه تابع

1. Differential Evolution Algorithm
2. Point Estimate Method
3. Monte Carlo Simulation
4. Scenario Based Modeling
5. Information Gap Decision Theory

6. Risk Averse

7. Risk Seeker

8. Genetic Algorithm

9. Conventional Unscented Transformation

$$V^{\min} \leq V_i^j \leq V^{\max}, \quad \forall i \in \Omega_L, j \in \Omega_s \quad (۳)$$

(۲) رعایت محدوده جریان مجاز خطوط

$$I_k^j \leq I_k^{\max}, \quad \forall k \in \Omega_K, j \in \Omega_s \quad (۴)$$

(۳) رعایت قید حداکثر جبران در شبکه

مجموع جبران‌سازی توان راکتیو از بار راکتیو شبکه نباید بیشتر باشد

$$\sum_{i=1}^N C_i \leq \sum_{i=1}^N C_{Loadi}, \quad \forall i \in \Omega_L \quad (۵)$$

که در روابط بالا  $V_i^j$  ولتاژ شین  $i$ ام در نمونه  $j$ ام،  $V^{\min}$  حد پایین ولتاژ سیستم توزیع،  $V^{\max}$  حد بالای ولتاژ سیستم توزیع،  $\Omega_L$  مجموعه نقاط بار،  $\Omega_s$  مجموعه نمونه‌های به دست آمده از تبدیل بی‌بو،  $\Omega_K$  مجموعه شاخه‌های شبکه،  $I_k^j$  جریان عبوری از شاخه  $k$ ام در نمونه  $j$ ام،  $I_k^{\max}$  حداکثر جریان مجاز عبوری از شاخه  $k$ ام،  $N$  تعداد شین‌های شبکه،  $C_i$  ظرفیت خازنی نصب‌شده در شین  $i$ ام و  $C_{Loadi}$  بار راکتیو شین  $i$ ام است.

## ۵- اصول روش تئوری تصمیم‌گیری بر مبنای شکاف اطلاعاتی (IGDT)

در این مقاله از روش IGDT برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در تولید توان نیروگاه بادی و بار در مسئله خازن‌گذاری استفاده شده است. روش پیشنهادی به یک تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند تا اولویت‌ها را تشخیص داده و ریسک‌ها و فرصت‌ها را ارزیابی نماید. اهمیت و تأکید اصلی IGDT این است که تصمیمات تحت شرایط سخت عدم قطعیت نباید نیاز به اطلاعات اضافی نسبت به اطلاعات قابل دسترس برای تصمیم‌گیرنده داشته باشد. در ادامه این روش به طور مختصر توضیح داده خواهد شد. تابع هدف مسایل بهینه‌سازی عموماً به صورت زیر بیان می‌شوند

$$y = \min f(X, d) \quad (۶)$$

$$H_i(X, d) = 0, \quad \forall i \in \Omega_I \quad (۷)$$

$$G_j(X, d) \geq 0, \quad \forall j \in \Omega_E \quad (۸)$$

در معادلات فوق،  $X$  بردار پارامترهای غیر قطعی ورودی و  $d$  بردار متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله می‌باشند. همچنین  $H$  و  $G$  نشان‌دهنده قیود مساوی و نامساوی مسئله هستند. توصیف ریاضی مجموعه عدم قطعیت‌ها به صورت زیر است

$$U(\alpha, \bar{X}) = \left\{ X : \left| \frac{X - \bar{X}}{\bar{X}} \right| \leq \alpha \right\} \quad (۹)$$

در معادله بالا  $\alpha$  مقدار حداکثر انحراف ممکن پارامتر غیر قطعی از مقدار پیش‌بینی‌شده خود است که به آن شعاع عدم قطعیت نیز اطلاق می‌شود.  $\bar{X}$  مقدار پیش‌بینی‌شده پارامتر  $X$  است. همچنین  $U(\alpha, \bar{X})$  مجموعه عدم قطعیت‌ها در رفتار پارامتر غیر قطعی ورودی را توصیف می‌کند. این رابطه بیان می‌کند که تغییرات پارامتر غیر قطعی  $X$  از مقدار پیش‌بینی‌شده  $\bar{X}$  بزرگ‌تر از  $\alpha \bar{X}$  نیست. همان‌طور که گفته شد، هدف اصلی در روش IGDT تعیین حداکثر تغییرات پارامترهای غیر قطعی نسبت به مقدار متوسط آنها است. بنابراین تعیین حداکثر تغییرات پارامترهای غیر قطعی هم به عنوان یک متغیر، تحت عنوان شعاع عدم قطعیت ( $\alpha$ ) و هم به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. شعاع عدم قطعیت ( $\alpha$ ) طوری تعیین می‌گردد که مقدار تابع هدف مسئله ( $f$ ) از

متعددی برای پخش بار احتمالی ارائه شده که از نظر دقت، سرعت عملکرد و مدل‌سازی همبستگی متغیرهای ورودی قابل مقایسه هستند. یکی از روش‌های مؤثر تحلیل عدم قطعیت، روش تبدیل بی‌بو<sup>۱</sup> (UT) است. الگوریتم‌های مبتنی بر تبدیل بی‌بو ابزارهای قدرتمندی جهت تحلیل مسایل احتمالاتی بوده و مهم‌ترین ویژگی آنها نسبت به سایر روش‌های متداول، امکان تحلیل مسایل احتمالاتی با متغیرهای وابسته می‌باشد، افزون بر این که از دقت و سرعت مناسب نیز برخوردار است. در این روش چنانچه  $n$  داده تصادفی وجود داشته باشد،  $2n+1$  نمونه با توجه به مقادیر ورودی داده‌های تصادفی، متوسط و کوواریانس آنها محاسبه می‌شود. سپس  $2n+1$  پخش بار قطعی با توجه به این نمونه‌ها اجرا شده و تلفات مربوط محاسبه می‌شود. در نهایت میانگین وزنی مقادیر تلفات به عنوان تلفات متوسط ارائه می‌شود. در این مقاله متغیرهای تصادفی، بار شبکه و خروجی نیروگاه بادی است ( $n=2$ ) و داده‌های ساعتی پیش‌بینی‌شده خروجی نیروگاه بادی و بار شبکه ورودی الگوریتم بی‌بو هستند. مراحل پیاده‌سازی تبدیل بی‌بوی متعارف به تفصیل در [۳۷] مطرح شده است.

## ۴- فرمول‌بندی مسئله

مسئله خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع شامل تعیین مکان و ظرفیت بهینه خازن‌ها با در نظر گرفتن قیود سیستم می‌باشد. در این مقاله، مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه خازن‌ها با در نظر گرفتن تغییرات بار شبکه و در حضور نیروگاه بادی انجام شده است.

### ۴-۱ تابع هدف

تابع هدف در نظر گرفته شده در این مقاله شامل کاهش هزینه تلفات انرژی، کاهش هزینه تلفات توان و حداقل کردن هزینه بانک‌های خازنی با در نظر گرفتن قیود سیستم می‌باشد. با در نظر گرفتن عدم قطعیت در توان تولیدی نیروگاه بادی و بار شبکه، تلفات شبکه با استفاده از تبدیل بی‌بوی متعارف محاسبه می‌شود

$$COST = K_E \times \lambda V \times \sum_{j=1}^{ns} (ploss_j \times W_j) + (K_p \times ploss^{\max}) + \sum_i^N (C_i \times K_C) \quad (۲)$$

که در این رابطه  $C_i$  مقدار خازن ثابت نصب‌شده در شین  $i$ ام،  $K_C$  هزینه هر کیلووات خازن ثابت،  $K_E$  قیمت هر کیلووات ساعت تلفات انرژی،  $K_p$  قیمت هر کیلووات تلفات توان،  $ploss^{\max}$  تلفات توان در پیک بار،  $ploss_j$  تلفات توان کل شبکه در نمونه  $j$ ام،  $ns$  تعداد نمونه‌های به دست آمده از تبدیل بی‌بوی متعارف و  $W_j$  ضرایب وزنی نمونه  $j$ ام به دست آمده از تبدیل بی‌بوی متعارف برای محاسبه تلفات انرژی است.

### ۴-۲ قیود مسئله

تابع هدف مسئله فوق دارای قیود زیر می‌باشد که باید رعایت گردد:

(۱) محدودیت ولتاژ شین‌ها  
دامنه ولتاژ هر شین در سیستم توزیع باید در محدوده مجاز قرار داشته باشد

$$\forall X \in U(\alpha, \bar{X}) \quad (21)$$

$$f(X, d) \leq l_c \quad (22)$$

$$l_c = f_b(X, d) \times (1 - \beta) \quad (23)$$

$$H_i(\bar{X}, d) = 0, \quad \forall i \in \Omega_I \quad (24)$$

$$G_j(\bar{X}, d) \geq 0, \quad \forall j \in \Omega_E \quad (25)$$

$$0 \leq \beta \leq 1 \quad (26)$$

یک درصد مشخص از مقدار پایه تابع هدف ( $f_b$ ) بیشتر نگردد. برای محاسبه مقدار پایه تابع هدف ( $f_b$ )، (۶) تا (۸) با فرض این که پارامتر غیر قطعی هیچ انحرافی از مقدار پیش‌بینی شده خود نداشته باشد، به صورت زیر بازنویسی می‌شود

$$f_b = \min(f(\bar{X}, d)) \quad (10)$$

$$H_i(\bar{X}, d) = 0, \quad \forall i \in \Omega_I \quad (11)$$

$$G_j(\bar{X}, d) \geq 0, \quad \forall j \in \Omega_E \quad (12)$$

در مدل ارائه‌شده در بالا، هدف تعیین حداقل شعاع عدم قطعیت ( $\alpha$ ) است به گونه‌ای که به ازای تغییرات پارامتر غیر قطعی مقدار تابع هدف مطابق (۲۳)، از مقدار پایه آن کمتر باشد.

### ۶- پیاده‌سازی روش IGDT بر روی مسئله

در این مقاله پارامترهای ورودی غیر قطعی، توان حقیقی تولیدشده توسط نیروگاه بادی و بار شبکه است که در رابطه تلفات شبکه (ploss) ظاهر می‌شود. در نتیجه مسئله خازن‌گذاری با در نظر گرفتن نیروگاه بادی در حالت پایه به صورت زیر تعریف می‌شود

$$cost_b = \min\{cost\}_{\forall P_{wb} = \bar{P}_{wb}, L_i = \bar{L}_i} \quad (27)$$

$$\text{Subject to: (3) - (5)} \quad (28)$$

در (۲۷)،  $cost_b$  هزینه کل خازن‌گذاری در حالت پایه است که در آن پارامترهای غیر قطعی دقیقاً برابر مقدار پیش‌بینی شده خود است. همچنین (۲۸) نشان‌دهنده این است که بایستی همه روابط (۳) تا (۵) به طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند. در ادامه مدل مسئله خازن‌گذاری با توجه به دو استراتژی ریسک‌گریز و ریسک‌جو ارائه خواهد شد.

### ۶-۱ مدل استراتژی ریسک‌گریز

با توجه به استراتژی ریسک‌گریز که در بخش قبل ارائه شد، در این استراتژی طراح سیستم به دنبال بدترین شرایطی است که به ازای تغییرات نامطلوب پارامترهای غیر قطعی به وجود بیاید. در مسئله خازن‌گذاری بدترین شرایط به ازای کاهش توان تولیدی نیروگاه بادی و افزایش بار اتفاق می‌افتد. کاهش توان تولیدی نیروگاه بادی و افزایش بار شبکه توزیع، منجر به افزایش تلفات سیستم شده و در نتیجه هزینه خازن‌گذاری نسبت به حالت پایه افزایش می‌یابد. مدل مسئله خازن‌گذاری با توجه به استراتژی ریسک‌گریز بیان شده به صورت زیر است

$$\max \alpha \quad (29)$$

$$\text{Subject to: (3) - (5)} \quad (30)$$

$$cost \leq cost_b \times (1 + \beta) \quad (31)$$

$$P_{wb} = \bar{P}_{wb} \times (1 - \alpha) \quad (32)$$

$$l = \bar{l} \times (1 + \alpha) \quad (33)$$

### ۶-۲ مدل استراتژی ریسک‌جو

در استراتژی ریسک‌جو، مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری به گونه‌ای تعیین می‌شوند که حداقل شعاع عدم قطعیت ممکن برای پارامتر غیر قطعی به ازای یک مقدار مشخصی از کاهش تابع هدف به دست آید. برخلاف استراتژی ریسک‌گریز، در استراتژی ریسک‌جو تغییرات

با استفاده از روابط بالا مقدار پایه تابع هدف به دست می‌آید. با توجه به موارد ذکرشده، روش IGDT یک روش دومرحله‌ای است که در مرحله اول، مطابق با مقادیر پیش‌بینی‌شده پارامترهای غیر قطعی، مقدار پایه تابع هدف مسئله تعیین می‌شود و در مرحله دوم نیز بر اساس مقدار پایه تابع هدف و حداکثر انحراف مورد نظر بهره‌بردار نسبت به مقدار پایه (بر اساس میزان ریسک قابل‌قبول بهره‌بردار)، شعاع عدم قطعیت پارامترهای غیر قطعی تعیین می‌گردد. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها با روش IGDT دو استراتژی ریسک‌گریز (RA) و ریسک‌جو (RS) وجود دارد.

### ۵-۱ استراتژی ریسک‌گریز (RA)

در استراتژی ریسک‌گریز، تصمیم‌گیری در مورد متغیرهای مسئله طوری انجام می‌شود که مسئله در مقابل تغییرات نامطلوب پارامترهای غیر قطعی مقاوم گردد. به بیان دیگر در استراتژی ریسک‌گریز طراح سیستم ریسک کمتری کرده و مطمئن خواهد بود که به ازای تغییرات نامطلوب پارامتر غیر قطعی تابع هدف از حد مجازی که برای تعیین شعاع عدم قطعیت پارامتر غیر قطعی در نظر گرفته شده است تجاوز نخواهد کرد

$$\max \alpha \quad (13)$$

$$\forall X \in U(\alpha, \bar{X}) \quad (14)$$

$$f(X, d) \leq l_c \quad (15)$$

$$l_c = f_b(X, d) \times (1 + \beta) \quad (16)$$

$$H_i(\bar{X}, d) = 0, \quad \forall i \in \Omega_I \quad (17)$$

$$G_j(\bar{X}, d) \geq 0, \quad \forall j \in \Omega_E \quad (18)$$

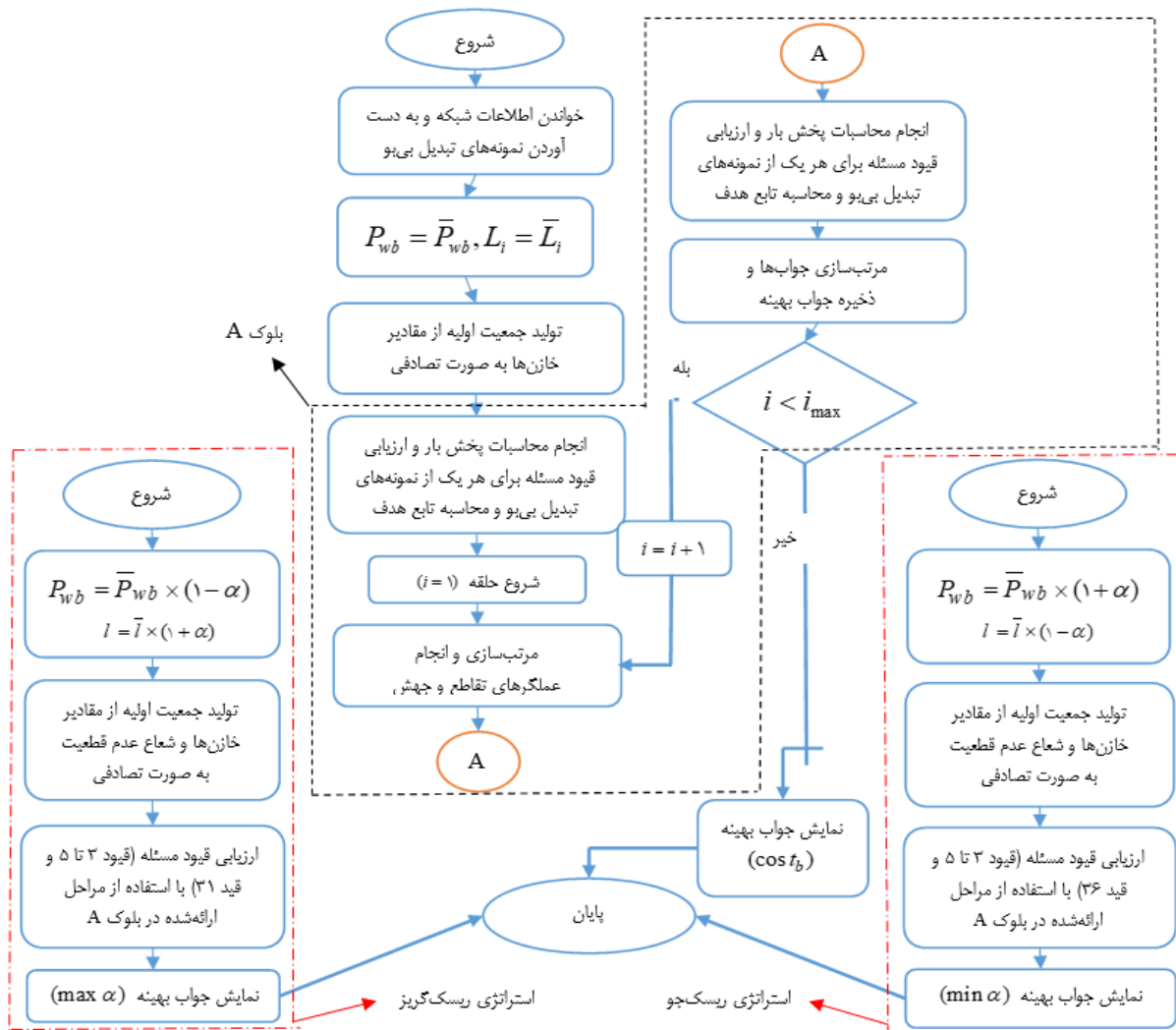
$$0 \leq \beta \leq 1 \quad (19)$$

در روابط بالا،  $l_c$  مقدار بحرانی تابع هدف است که غالباً توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود. همچنین  $\beta$  ضریب حداکثر انحراف از مقدار پایه تابع هدف است که توسط بهره‌بردار مشخص می‌شود.

### ۵-۲ استراتژی ریسک‌جو (RS)

این استراتژی مربوط به حالتی است که عدم قطعیت پارامتر غیر قطعی اثر مطلوبی بر روی تابع هدف مسئله داشته باشد. برخلاف استراتژی ریسک‌گریز، در استراتژی ریسک‌جو تصمیم‌گیری در مورد متغیرهای مسئله طوری انجام می‌شود که مسئله در مقابل تغییرات نامطلوب پارامترهای غیر قطعی مقاوم گردد. به بیان دیگر در استراتژی ریسک‌جو بهره‌بردار ریسک بالاتری کرده و به دنبال استفاده از فرصت احتمالی حاصل از تغییرات نامطلوب پارامترهای غیر قطعی جهت دستیابی به سود بیشتر یا هزینه کمتر است

$$\min \alpha \quad (20)$$



شکل ۱: روندنمای روش پیشنهادی.

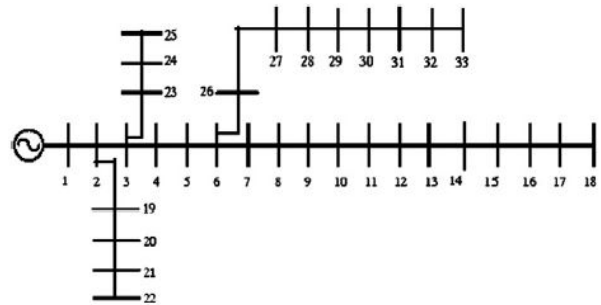
$$l = \bar{l} \times (1 - \alpha) \tag{۳۸}$$

روندنمای روش پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. برای دستیابی به پاسخ بهینه از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. کروموزوم در نظر گرفته شده در این مقاله برای بهینه‌سازی روش پیشنهادی شامل یک سطر و  $(N + 1)$  ستون می‌باشد که در آن:

- ستون اول، نشان‌دهنده ظرفیت خازن‌ها بر حسب کیلووار در  $N$  مکان کاندید در شین‌های فیدر است.
- ستون  $N + 1$  نشان‌دهنده مقدار شعاع عدم قطعیت پارامترهای غیر قطعی مسئله خازن‌گذاری می‌باشد  $(\alpha)$ .

### ۷- مطالعات عددی

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، الگوریتم مسئله بر روی شبکه توزیع ۳۳ شینه IEEE اجرا شده است. مقدار تقاضای توان اکتیو و راکتیو این سیستم در شرایط نامی به ترتیب برابر ۳۷۱۵ کیلووات و ۲۳۰۰ کیلووار می‌باشد. دیاگرام تک‌خطی این سیستم در شکل ۲ نشان داده شده و اطلاعات مربوط به خطوط و بارهای این سیستم در [۳۸] آمده است. با اعمال پخش بار روی این شبکه مجموع تلفات توان اکتیو در حالت اولیه ۲۱۰۹۹۸ کیلووات و مجموع تلفات توان راکتیو ۱۴۳۰۳۲ کیلووار خواهد شد. کمترین ولتاژ در شین ۱۸ مشاهده می‌شود و مقدار آن ۰٫۹۰۳۷۷ پرینیت است. فرض بر این است که یک نیروگاه بادی با ظرفیت ۱۴۰۰



شکل ۲: دیاگرام تک‌خطی شبکه ۳۳ شینه IEEE.

پارامترهای غیر قطعی سبب کاهش تابع هدف از مقدار پایه می‌شود. در مسئله خازن‌گذاری تغییرات مطلوب پارامترهای غیر قطعی به صورت افزایش توان تولیدی نیروگاه بادی و کاهش بار شبکه می‌باشد. مدل مسئله خازن‌گذاری با توجه به استراتژی ریسک‌جو به صورت زیر بیان می‌شود

$$\min \alpha \tag{۳۴}$$

$$\text{Subject to: } (۳) - (۵) \tag{۳۵}$$

$$\text{cost} \leq \text{cost}_b \times (1 - \beta) \tag{۳۶}$$

$$P_{wb} = \bar{P}_{wb} \times (1 + \alpha) \tag{۳۷}$$

جدول ۳: مکان و ظرفیت خازن‌ها برای شبکه ۳۳ شینه.

شماره شین	ظرفیت خازن (kVar)
۱۶	۱۰۰
۲۴	۲۰۰
۲۷	۱۰۰
۳۰	۵۰۰
۳۳	۲۰۰

جدول ۴: نتایج خازن‌گذاری برای شبکه ۳۳ شینه در حالت پایه.

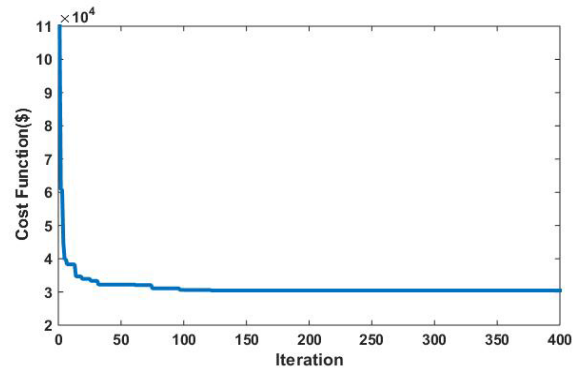
سطوح بار	قبل از خازن‌گذاری	بعد از خازن‌گذاری	
نمونه اول	تلفات (kW)	۳۷,۲۳۸۰	۲۱,۷۲۳۱
	$V_{min}@33$	۰,۹۶۳۷	۰,۹۸۱۰
نمونه دوم	تلفات (kW)	۹۴,۳۱۷۵	۶۱,۲۰۸۸
	$V_{min}@33$	۰,۹۴۰۰	۰,۹۵۵۶
نمونه سوم	تلفات (kW)	۴۴,۴۷۳۴	۳۴,۰۱۱۳
	$V_{min}@33$	۰,۹۷۴۹	۰,۹۸۷۳
نمونه چهارم	تلفات (kW)	۱۳,۳۳۳۰	۱۰,۹۱۰۲
	$V_{min}@33$	۰,۹۸۶۳	۰,۹۹۵۶
نمونه پنجم	تلفات (kW)	۷۷,۷۰۰۰	۵۹,۸۷۲۷
	$V_{min}@18$	۰,۹۴۱۸	۰,۹۴۷۶
مجموع تابع هزینه (\$)	۴۰,۶۶۳	۳۰,۱۵۳	
مجموع هزینه تلفات انرژی (\$)	۲۴,۸۱۷	۱۶,۵۷۰	
مجموع هزینه تلفات توان (\$)	۱۵,۸۴۵	۱۰,۲۸۳	
زمان اجرای روش (second)	۵۶,۸۹		

## ۱-۷ حل مسئله خازن‌گذاری با در نظر گرفتن نیروگاه بادی در حالت پایه

در این حالت بار شبکه در هر ساعت از بازه تحت مطالعه مقداری مشخص و برابر مقدار پیش‌بینی شده دارد. سرعت باد در هر ساعت و به دنبال آن توان خروجی نیروگاه بادی در هر ساعت مشخص و برابر مقدار پیش‌بینی شده است (۸۷۶۰ داده ساعتی برای توان خروجی در دسترس است). لذا برای محاسبه تلفات انرژی و ارزیابی تابع هدف از اطلاعات جدول ۱ استفاده می‌شود. جدول‌های ۳ و ۴ نشان‌دهنده مکان و ظرفیت خازن‌ها و پارامترهای تابع هدف قبل و بعد از خازن‌گذاری برای شبکه ۳۳ شینه می‌باشد. همچنین نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

## ۲-۷ حل مسئله خازن‌گذاری با در نظر گرفتن نیروگاه بادی در حالت استراتژی ریسک‌جو

برای پیاده‌سازی استراتژی ریسک‌جو فرض می‌شود که حداکثر ۱۰ درصد کاهش هزینه نسبت به مقدار پایه توسط بهره‌بردار سیستم قابل تحمل است. پس مسئله خازن‌گذاری به ازای  $\beta = 0.1$  حل می‌شود و حداقل شعاع عدم قطعیت در تولید توان از نیروگاه بادی و بار مصرفی شبکه به دست می‌آید. جدول‌های ۵ و ۶ نشان‌دهنده مکان و ظرفیت خازن‌ها و پارامترهای تابع هدف قبل و بعد از خازن‌گذاری در حالت



شکل ۳: نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای خازن‌گذاری در حالت پایه.

جدول ۱: نمونه‌های به دست آمده به روش تبدیل بی‌بوی متعارف.

نمونه‌ها	توان اکتیو (kW)	توان اکتیو بادی (kW)
۱	۲۲۸۲,۵	۷۶۳,۲۸
۲	۳۳۲۶,۸	۷۶۳,۲۸
۳	۲۲۴۲,۴	۱۴۰۰
۴	۱۲۳۸,۲	۷۶۳,۲۸
۵	۲۳۲۲,۶	۰

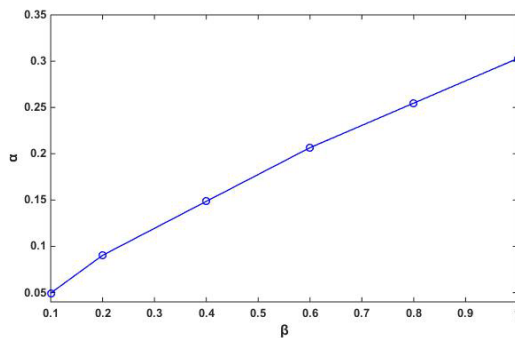
جدول ۲: بررسی صحت نتایج تبدیل بی‌بوی متعارف برای شبکه پایه.

نمونه‌های بی‌بوی متعارف (%)	تبدیل بی‌بوی متعارف	شبیه‌سازی مونت کارلو	خطای روش تبدیل بی‌بوی متعارف (%)
میانگین تلفات انرژی (kW)	۶۰,۸۲۵۶	۶۰,۶۵۵۶	۰,۲۸
میانگین ولتاژ شین ۱۸ (p.u)	۰,۹۷۳۰	۰,۹۷۳۰	۰

کیلووات در شین ۱۰ نصب شده است [۳۹]. در این مقاله تغییرات بار ساعتی بر اساس بار شبکه IEEE-RST است [۴۰]. همچنین از اطلاعات سرعت باد [۴۱] استفاده شده است. در روند شبیه‌سازی هزینه هر کیلووات ساعت تلفات انرژی برابر  $K_e = 0.06 \$/KWh$ ، ضریب  $K_e$  در محاسبه تابع شایستگی برابر  $K_e = 3 \$/KVar$  در نظر گرفته شده [۴۲] و هزینه هر کیلووات تلفات توان برابر  $K_p = 168 \$/KW$  فرض شده است [۱۵]. همچنین  $V_{min} = 0.9 Pu$  و  $V_{max} = 1.1 Pu$  می‌باشد.

همان‌طور که در بخش دوم اشاره شد از تبدیل بی‌بوی متعارف برای محاسبه تلفات انرژی در مسئله خازن‌گذاری استفاده می‌شود. جدول ۱ نشان‌دهنده نمونه‌های به دست آمده از تبدیل بی‌بوی متعارف می‌باشد. در جدول ۲ به بررسی صحت نتایج به دست آمده از روش تبدیل بی‌بوی متعارف برای شبکه ۳۳ شینه از طریق مقایسه با شبیه‌سازی مونت کارلو پرداخته شده است.

در ادامه ابتدا، تعیین مکان و ظرفیت بهینه خازن‌ها در حالت پایه انجام می‌شود. سپس مسئله خازن‌گذاری به ازای میزان مجاز کاهش هزینه مورد بررسی قرار خواهد گرفت که این تحلیل همان استراتژی ریسک‌جو است. در بخش بعدی مسئله خازن‌گذاری به ازای میزان مجاز افزایش هزینه مورد بررسی قرار خواهد گرفت که این تحلیل همان استراتژی ریسک‌گریز است. سپس با انجام تحلیل حساسیت به بررسی تأثیر تغییرات درصد مجاز افزایش هزینه ( $\beta$ ) بر روی شعاع عدم قطعیت پارامتر غیر قطعی، هزینه کل خازن‌گذاری، تلفات و ولتاژ شبکه در حالت استراتژی ریسک‌گریز خواهیم پرداخت.

شکل ۴: تغییرات  $\alpha$  بر حسب تغییرات  $\beta$ .

جدول ۷: مکان و ظرفیت خازن‌ها برای شبکه ۳۳ شینه در حالت RA.

$\beta$	شماره شین (ظرفیت شین (kVar))
۰٫۱	(۱۰۰)۱۴، (۷۰۰)۳۰، (۱۰۰)۳۱
۰٫۲	(۷۰۰)۳۰، (۱۰۰)۲۶، (۲۰۰)۲۵، (۱۰۰)۱۴
۰٫۴	(۸۰۰)۳۰، (۱۰۰)۲۹، (۱۰۰)۱۴، (۱۰۰)۱۱
۰٫۶	(۹۰۰)۳۰، (۱۰۰)۱۵، (۲۰۰)۸
۰٫۸	(۸۰۰)۳۰، (۲۰۰)۱۰، (۴۰۰)۷
۱	(۳۰۰)۳۳، (۴۰۰)۳۰، (۴۰۰)۲۸، (۱۰۰)۱۶، (۳۰۰)۴

می‌شود، در استراتژی ریسک‌گریز با افزایش هزینه، عدم قطعیت در نظر گرفته شده برای توان تولیدی نیروگاه بادی و بار شبکه افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات  $\alpha$  بر حسب هزینه کل به ازای تغییرات  $\beta$  های مختلف و تغییرات مینیمم ولتاژ به ازای تغییرات  $\beta$  به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن عدم قطعیت در توان خروجی نیروگاه بادی و بار شبکه، مکان و ظرفیت بهینه خازن‌ها در شبکه توزیع تعیین گردید. لحاظ کردن عدم قطعیت در مسئله مورد مطالعه، نه تنها خطای مدل‌سازی را کاهش می‌دهد بلکه بر روی پاسخ به دست آمده نیز تأثیرگذار است. بدین منظور از روش تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر مبنای شکاف اطلاعاتی برای مدل‌سازی عدم قطعیت ذاتی موجود در توان خروجی نیروگاه بادی و بار شبکه استفاده می‌شود. پاسخ بهینه مسئله خازن‌گذاری بر اساس الگوریتم ژنتیک حاصل می‌شود. به دلیل عدم قطعیت موجود در مسئله نیاز به یک روش احتمالاتی برای اجرای پخش بار می‌باشد. به همین دلیل در این مقاله از روش احتمالاتی تبدیل بی‌بوی متعارف استفاده شده است.

نتایج به دست آمده بر روی شبکه توزیع ۳۳ شینه IEEE، نشان می‌دهند که در استراتژی ریسک‌گریز به ازای میزان مشخصی افزایش هزینه، شعاع عدم قطعیت در توان خروجی نیروگاه بادی و بار شبکه افزایش می‌یابد. همچنین در این استراتژی با افزایش  $\beta$  هزینه کل خازن‌گذاری و تلفات شبکه افزایش می‌یابد.

## مراجع

- [1] Online available on, <http://www.tavanir.org.ir>.
- [2] J. Vuletic and M. Todorovski, "Optimal capacitor placement in distorted distribution networks with different load models using penalty free genetic algorithm," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 78, pp. 174-182, Jun. 2016.
- [3] A. Arief and M. Bachtiar Nappu, "An analytical method for optimal capacitors placement from the inversed reduced jacobian matrix," in

جدول ۵: مکان و ظرفیت خازن‌ها برای شبکه ۳۳ شینه.

شماره شین	ظرفیت خازن (kVar)
۴	۱۰۰
۲۵	۱۰۰
۳۰	۴۰۰
۳۳	۳۰۰

جدول ۶: نتایج خازن‌گذاری برای شبکه ۳۳ شینه در حالت RS.

سطوح بار	قبل از خازن‌گذاری	بعد از خازن‌گذاری در حالت ریسک‌جو	
نمونه اول	تلفات (kW)	۳۷،۲۳۸۰	۲۰،۰۶۰۸
نمونه دوم	تلفات (kW)	۹۴،۳۱۷۵	۵۳،۳۱۲۴
نمونه سوم	تلفات (kW)	۴۴،۶۷۳۴	۳۶،۷۳۴۶
نمونه چهارم	تلفات (kW)	۱۳،۳۳۳۰	۱۴،۸۲۴۹
نمونه پنجم	تلفات (kW)	۷۷،۷۰۰۰	۵۱،۰۹۱۴
مجموع تابع هزینه (\$)	-	۴۰۶۶۳	۲۷۱۳۲
مجموع هزینه تلفات انرژی (\$)	-	۲۴۸۱۷	۱۵۴۷۶
مجموع هزینه تلفات توان (\$)	-	۱۵۸۴۵	۸۹۵۶،۵
شعاع عدم قطعیت	-	۰،۰۴۳۴	
زمان اجرای روش (second)	-	۱۳۱۶،۸	

استراتژی ریسک‌جو می‌باشد و مینیمم ولتاژ بعد از خازن‌گذاری در این حالت برابر ۰٫۹۴۹۵ پریونیت است. همچنین در این استراتژی به ازای  $\beta$  بزرگ‌تر از ۰٫۱ قید هزینه کل که در (۳۶) بیان شد رعایت نمی‌گردد.

## ۷-۳ حل مسئله خازن‌گذاری با در نظر گرفتن نیروگاه

### بادی در حالت استراتژی ریسک‌گریز

برای پیاده‌سازی استراتژی ریسک‌گریز، فرض می‌شود که حداکثر  $\beta$  درصد افزایش هزینه نسبت به مقدار پایه توسط بهره‌بردار سیستم قابل تحمل است. پس مسئله خازن‌گذاری به ازای حالت‌های زیر حل می‌شود و حداکثر شعاع عدم قطعیت در توان تولیدی نیروگاه بادی و بار مصرفی شبکه به دست می‌آید:

سناریوی (a)  $\beta = 0.1$

سناریوی (b)  $\beta = 0.2$

سناریوی (c)  $\beta = 0.4$

سناریوی (d)  $\beta = 0.6$

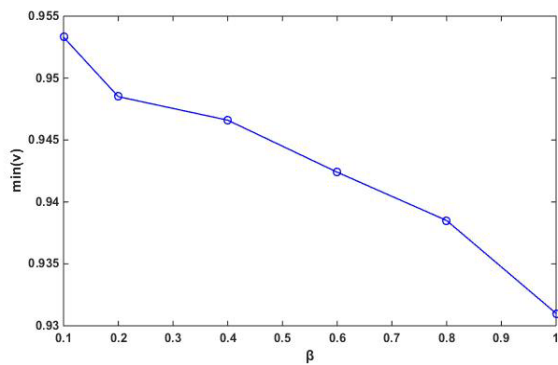
سناریوی (e)  $\beta = 0.8$

سناریوی (f)  $\beta = 1$

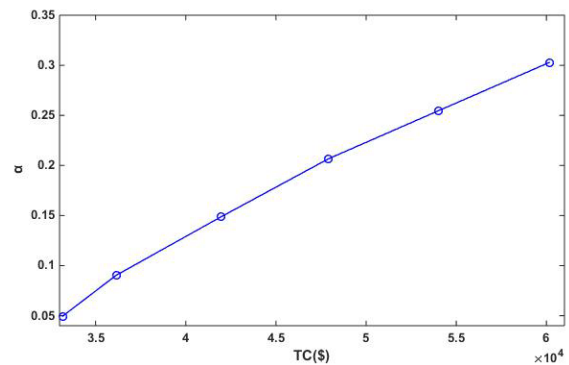
جدول‌های ۷ و ۸ نشان‌دهنده مکان و ظرفیت خازن‌ها و پارامترهای تابع هدف قبل و بعد از خازن‌گذاری به ازای سناریوهای a تا f می‌باشد. در جدول ۸ مقادیر میانگین تلفات، هزینه تلفات و هزینه کل قبل و بعد از خازن‌گذاری دیده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در استراتژی ریسک‌گریز با افزایش  $\beta$ ، شعاع عدم قطعیت توان تولیدی نیروگاه بادی و بار شبکه افزایش می‌یابد. حساسیت پارامتر  $\alpha$  نسبت به افزایش هزینه در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه





شکل ۶: تغییرات مینیمم ولتاژ به ازای تغییرات  $\beta$ .



شکل ۵: تغییرات  $\alpha$  بر حسب تغییرات هزینه کل به ازای  $\beta$  های مختلف.

جدول ۸: نتایج خازن‌گذاری برای شبکه ۳۳ شینه در حالت RA به ازای  $\beta$  های مختلف.

	$\beta = 0.1$		$\beta = 0.2$		$\beta = 0.4$		$\beta = 0.6$		$\beta = 0.8$		$\beta = 1$	
	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد
مجموع هزینه تلفات انرژی (\$)	۲۴۸۱۷	۱۸۵۱۰	۲۴۸۱۷	۱۹۵۰۴	۲۴۸۱۷	۲۲۹۵۵	۲۴۸۱۷	۲۶۰۱۴	۲۴۸۱۷	۲۹۱۴۹	۲۴۸۱۷	۳۲۲۵۸
مجموع هزینه تلفات توان (\$)	۱۵۸۴۵	۱۱۹۵۶	۱۵۸۴۵	۱۳۳۳۲	۱۵۸۴۵	۱۵۶۹۰	۱۵۸۴۵	۱۸۲۹۲	۱۵۸۴۵	۲۰۶۷۳	۱۵۸۴۵	۲۳۳۹۹
مجموع تابع هزینه (\$)	۴۰۶۶۳	۳۳۱۶۶	۴۰۶۶۳	۳۶۱۳۶	۴۰۶۶۳	۴۱۹۴۴	۴۰۶۶۳	۴۷۹۰۶	۴۰۶۶۳	۵۴۰۲۱	۴۰۶۶۳	۶۰۱۵۷
شعاع عدم قطعیت		۰/۰۴۹۵		۰/۰۹۰۳		۰/۱۴۸۶		۰/۲۰۶۶		۰/۲۵۴۷		۰/۳۰۲۸
زمان اجرای روش (second)	۱۱۶۶/۸											

*J. of Engineering Trends and Technology*, vol. 9, no. 14, pp. 729-731, Mar. 2014.

[15] Y. M. Shuaib, M. S. Kalavathi, and C. C. Asir Rajan, "Optimal capacitor placement in radial distribution system using Gravitational Search Algorithm," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 384-397, Jan. 2015.

[16] A. Y. Abdelaziz, S. A. Ehab, and S. M. Abd Elazim, "Flower pollination algorithm for optimal capacitor placement and sizing in distribution systems," *Electric Power Components and Systems*, vol. 44, no. 5, pp. 544-555, 2016.

[17] A. A. A. El-Ela, R. A. El-Schiemy, A. M. Kinawy, and M. T. Mouwafi, "Optimal capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage profile improvement," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 5, pp. 1209-1221, Apr. 2016.

[18] V. Tamilselvan, T. Jayabarathi, and T. Raghunathan, "Optimal capacitor placement in radial distribution systems using flower pollination algorithm," *Alexandria Engineering J.*, vol. 57, no. 4, pp. 2775-2786, Dec. 2018.

[19] C. S. Lee, H. V. Hultmann Ayala, and C. Leandro, "Capacitor placement of distribution systems using particle swarm optimization approaches," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 839-851, Jan. 2015.

[20] N. Kanwar, N. Gupta, A. Swarnkar, K. R. Niazi, and R. C. Bansal, "New sensitivity based approach for optimal allocation of shunt capacitors in distribution networks using PSO," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1153-1158, 2015.

[21] M. Dixit, P. Kundu, and R. Jariwala, "Optimal integration of shunt capacitor banks in distribution networks for assessment of techno-economic asset," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 71, pp. 331-345, Oct. 2018.

[22] M. H. Shwehdi, S. R. Mohamed, and D. Devaraj, "Optimal capacitor placement on West-East inter-tie in Saudi Arabia using genetic algorithm," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 68, pp. 156-169, May 2018.

[23] M. D. Reddy and V. C. Reddy, "Optimal capacitor placement using fuzzy and real coded genetic algorithm for maximum savings," *J. of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 219-226, Dec. 2008.

[24] S. A. Mousavi, R. Ebrahimi, and M. Ghanbari, "Optimal capacitor placement in radial distribution networks considering uncertainty in *Proc. 3rd Int. Conf. on Power and Energy Systems Engineering, CPESE'16*, pp. 307-310, Kitakyushu, Japan, 8-12 Sept. 2016.

[4] R. Baldick and F. F. Wu, "Efficient integer optimization algorithms for optimal coordination of capacitors and regulators," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 805-812, Aug. 1990.

[5] J. Pyng Chiou and C. Fu Chang, "Development of a novel algorithm for optimal capacitor placement in distribution systems," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 684-690, Dec. 2015.

[6] D. B. Prakash and C. Lakshminarayana, "Optimal siting of capacitors in radial distribution network using whale optimization algorithm," *International J. of Alexandria Engineering*, vol. 56, no. 4, pp. 499-506, Dec. 2017.

[7] D. Neupane, B. Poudel, N. Khatri, D. Yadav, and D. Khadka, "Optimal capacitor placement using particle swarm optimization (PSO): a case study in 33 kV distribution system," *Proc. of IOE Graduate Conf.*, vol. 7, pp. 121-126, Dec. 2019.

[8] Y. Ogita and H. Mori, "Parallel dual tabu search for capacitor placement in smart grids," *Procedia Computer Science*, vol. 12, pp. 307-313, 2012.

[9] S. A. Kumar and K. J. Goud, "Power loss reduction in radial distribution system by using plant growth simulation algorithm," *J. of Energy Technologies Policy*, vol. 3, no. 1, pp. 19-26, 2012.

[10] P. Suresh Babu, B. Pamuleti, and M. Padma lalitha, "Optimal performance enhancement of capacitor in radial distribution system using fuzzy and HAS," *IOSR J. of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 26-32, Jan. 2014.

[11] S. Sultana and P. K. Roy, "Optimal capacitor placement in radial distribution systems using teaching learning based optimization," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 54, pp. 387-398, Jan. 2014.

[12] A. A. El-Fergany and A. Y. Abdelaziz, "Capacitor allocations in radial distribution networks using cuckoo search algorithm," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 2, pp. 223-232, Feb. 2014.

[13] A. A. El-Fergany and A. Y. Abdelaziz, "Artificial bee colony algorithm to allocate fixed and switched static shunt capacitors in radial distribution networks," *Electric Power Components and Systems*, vol. 42, no. 5, pp. 427-438, May 2014.

[14] J. Singh, M. Tiwari, and M. Oza, "Capacitor placement in radial distribution system using ant colony search algorithm," *International*



- storage-based intelligent parking lot of electric vehicles," *J. of Energy Storage*, vol. 27, Article No.: 101057, Feb. 2020.
- [36] P. Giorsetto and K. F. Utsurogi, "Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, no. 1, pp. 134-143, Jan. 1983.
- [37] S. Julier and J. Uhlmann, "Unscented filtering and nonlinear estimation," in *IEEE Proc.*, vol. 92, no. 3, pp. 401-422, Mar. 2004.
- [38] M. A. Kashem, V. Ganapathy, G. B. Jasmon, and M. I. Buhari, "A novel method for loss minimization in distribution networks," in *Proc. Int. Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, vol. 1, pp. 251-256, Apr. 2000.
- [39] M. Hosseini and R. Baghipour, "Optimal placement of DGs in distribution system including different load models for loss reduction using genetic algorithm," *J. of Advances in Computer Research*, vol. 4, no. 3, pp. 55-68, Aug. 2013.
- [40] C. Gric, et al., "IEEE Reliability Test System - A Report Prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1010-1020, Aug. 1999.
- [41] <http://ndawn.ndsu.nodak.edu/wind-speed.html>, (online).
- [42] M. Ramalinga, K. V. C. Ramachandra, and K. Ravindra, "Direct search algorithm for capacitive compensation in radial distribution systems," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 24-30, Nov. 2012.
- load using PSO algorithm," *Sci. Int. (Lahore)*, vol. 27, no. 3, pp. 2569-2573, May 2015.
- [25] M. Mukherjee and S. K. Goswami, "Solving capacitor placement problem considering uncertainty in load variation," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 62, no. 1, pp. 90-94, Nov. 2014.
- [26] A. Najafi, R. Aboli, H. Falaghi, and M. Ramezani, "Capacitor placement in distorted distribution network subject to wind and load uncertainty," *J. of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 153-164, Dec. 2016.
- [27] M. B. Jannat and A. S. Savic, "Optimal capacitor placement in distribution networks regarding uncertainty in active power load and distributed generation units production," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 12, pp. 3060-3067, Sept. 2016.
- [28] V. Calderaro, V. Galdi, A. Piccolo, G. Conio, and R. Fusco, "Wind farm power plant: optimal capacitor placement for reactive power compensation," *IEEE PES ISGT Europe, Lyngby*, vol. 1, no. 1, pp. 1-5, Oct. 2013.
- [29] H. S. Ramadan, A. F. Bendary, and S. Nagy, "Particle swarm optimization algorithm for capacitor allocation problem in distribution systems with wind turbine generators," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 84, no. 2, pp. 143-152, Jan. 2017.
- [30] P. Jekhouni, A. Safari, and A. Sakhavati, "A multi objective genetic algorithm for capacitor placement in unbalanced and harmonic distorted distribution systems," *International J. on Technical and Physical Problems of Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 1-10, Sept. 2012.
- [31] E. A. Al-Ammar, et al., "Comprehensive impact analysis of ambient temperature on multi-objective capacitor placements in a radial distribution system," *Ain Shams Engineering J.*, vol. 12, no. 1, pp. 717-727, Mar. 2020.
- [32] A. Rabiee, A. Soroudi, and A. Keane, "Information gap decision theory based OPF with HVDC connected wind farms," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 30, no. 6, pp. 3396-3406, Nov. 2015.
- [33] S. Dehghan, A. Kazemi, and N. Amjadi, "Multi-objective robust transmission expansion planning using information-gap decision theory and augmented  $\epsilon$ -constraint method," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 5, pp. 828-840, May 2014.
- [34] X. Dai, Y. Wang, S. Yang, and K. Zhang, "IGDT-based economic dispatch considering the uncertainty of wind and demand response," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 6, pp. 856-866, Apr. 2019.
- [35] J. Liu, C. Chen, Z. Liu, K. Jermstittiparsert, and N. Ghadimi, "An IGDT-based risk-involved optimal bidding strategy for hydrogen

**محبوبه اعتمادی زاده** مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۶ از دانشگاه بیرجند دریافت نمود. در سال ۱۳۹۶ به دوره دکترای مهندسی برق قدرت در دانشگاه بیرجند وارد گردید و هم‌اکنون دانشجوی ترم ۶ دکتری می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مطالعات طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع و مدیریت و کنترل توان راکتیو در شبکه‌های توزیع.

**مریم رضائی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق از دانشگاه فردوسی مشهد و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۷ از دانشگاه تربیت مدرس در تهران به پایان رسانده است. از سال ۱۳۸۷ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند مطالعات طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع و مطالعات احتمالی می‌باشد.