

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۱۶

## برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع اکتیو و راکتیو مقید به امنیت و لتاژ در شبکه توزیع هوشمند قابل بازآرایی

اسحاق فرجی<sup>۱</sup>، علیرضا عباسی<sup>۲\*</sup>، صمد نجاتیان<sup>۳</sup>، محمود زاده باقری<sup>۴</sup>، حمید پروین<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

eshagh1363@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فسا، فسا، فارس، ایران

abbasi.a@fasau.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

nejatian@iauyasooj.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

mzadehbagheri@gmail.com, parvinhamid@gmail.com

**چکیده:** در این مقاله، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع اکتیو و راکتیو در شبکه توزیع هوشمند (SDN) دارای قابلیت بازآرایی سیستم و طرح پاسخ‌گویی بار (DRP) با در نظر گرفتن امنیت و لتاژ ارائه می‌شود. از این رو طرح مذکور به منظور مدل‌سازی همزمان شاخص‌های اقتصادی، بهره‌برداری و امنیت SDN یک مسئله سه‌هدفه بیان می‌کند که توابع هدف آن به ترتیب کمینه‌سازی هزینه سالیانه برنامه‌ریزی منابع و بهره‌برداری شبکه و منابع، کمینه‌سازی تابع انحرافات و لتاژ، و بیشینه‌سازی شاخص امنیت و لتاژ را در نظر می‌گیرد. قیود مسئله شامل معادلات پخش توان بهینه AC و بازآرایی شبکه، مدل بهره‌برداری و برنامه‌ریزی منابع اکتیو و راکتیو، فرمول‌بندی طرح پاسخ‌گویی بار، و محدودیت امنیت و لتاژ شبکه است. در ادامه، مسئله چندهدفه پیشنهادی توسط تکنیک بهینه‌سازی پارتو مبنی بر روش مجموع توابع وزندار به یک مسئله یکپارچه تک‌هدفه تبدیل می‌شود. سپس حل‌کننده ترکیبی بهینه‌سازی دسته میگوها (KHO) و الگوریتم جست‌وجوی کلاغ (CSA) جهت دستیابی به راه‌حل بهینه مطمئن با انحراف معیار پایین در پاسخ‌دهی استفاده می‌شود. در نهایت، طرح پیشنهادی بر روی SDN شعاعی ۶۹ با سه اعمال می‌شود و سپس نتایج عددی به دست آمده تأییدکننده قابلیت این طرح در بهبود وضعیت اقتصادی، بهره‌برداری و امنیت SDN است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم تکاملی ترکیبی، امنیت و لتاژ، بازآرایی سیستم، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع اکتیو و راکتیو، تکنیک بهینه‌سازی پارتو، شبکه توزیع هوشمند.

## ۱. مقدمه

عموماً بهبود وضعیت شاخص‌های بهره‌برداری و امنیت شبکه توزیع هوشمند<sup>۱</sup> (SDN) از اهداف مهم اپراتور آن یا اپراتور سیستم توزیع<sup>۲</sup> (DSO) است [۱]. از این رو آن با برقراری ارتباط دوطرفه با منابع و بارهای مختلف در سطح SDN مانند تولیدات پراکنده<sup>۳</sup> (DGها)، بانک خازنی سوئیچ‌شونده<sup>۴</sup> (SCB)، طرح پاسخ‌گویی بار<sup>۵</sup> (DRP) و بازآرایی شبکه<sup>۶</sup> می‌تواند قدمی در مدیریت عملکرد این عناصر در راستای دستیابی به اهداف مذکور بردارد [۲-۳]. این طرح با اجرای سیستم مدیریت انرژی<sup>۷</sup> (EMS) یا توان<sup>۸</sup> (PMS) در SDN قابل دستیابی است [۴]. علاوه بر این موضوع، از عوامل‌های مهم دیگری که مؤثر بر بهبود شاخص‌های بهره‌برداری مانند کمینه‌سازی تلفات شبکه و انحراف ولتاژ، و امنیت SDN مانند امنیت ولتاژ<sup>۹</sup> است، جایابی و اندازه‌یابی بهینه منابع اکتیو و راکتیو می‌باشد. بنابراین برای دستیابی به چنین هدفی نیاز به تعریف مسئله ترکیبی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری در SDN است تا اینکه بتوان همزمان وضعیت شاخص‌های فنی از قبیل بهره‌برداری و امنیت شبکه را در کنار وضعیت شاخص‌های اقتصادی شبکه بهبود داد [۵].

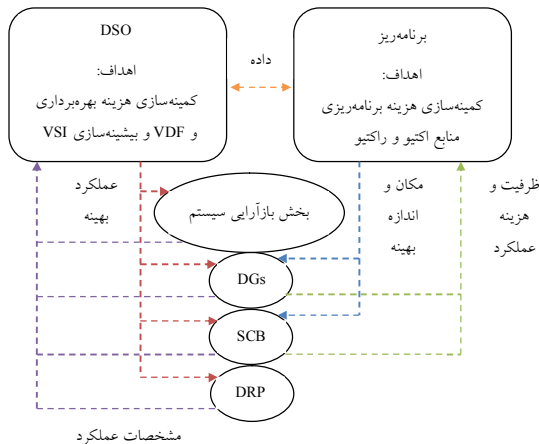
در زمینه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه توزیع در حضور منابع، و بارهای اکتیو تحقیقات و کارهای مختلفی صورت گرفته است؛ به طوری که نویسندگان در مرجع [۶] مدل‌سازی مسئله جایابی و اندازه‌یابی DGها از دیدگاه مالکان آنها و سرمایه‌گذاران خصوصی در سیستم قدرت را بیان کرده‌اند. آنها برای دستیابی به سود بیشینه در بازار انرژی مبنی بر مدل حوضچه توان مشارکت می‌کنند. مسئله نیز به صورت غیرخطی است که نویسندگان استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۱۰</sup> (PSO) را پیشنهاد داده‌اند. در مرجع [۷] نیز برنامه‌ریزی DGها در شبکه توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های سرعت باد، تابش خورشید و بار مصرفی فرمول‌بندی شده است. مسئله مذکور دارای چهارچوب بهینه‌سازی دوهدفه است که در یک تابع هزینه سالیانه برنامه‌ریزی کمینه می‌شود، و در تابع دیگر ریسک برنامه‌ریزی کمینه می‌شود. در مرجع [۸] نیز تأثیر

جایابی و اندازه‌یابی بهینه DGها بر روی قابلیت اطمینان شبکه توزیع مطرح شده است، به طوری که برنامه‌ریزی بهینه این منابع قادر است که قابلیت اطمینان سیستم را به میزان بالایی بهبود دهد. برنامه‌ریزی (جایابی و اندازه‌یابی) DG تجدیدپذیر<sup>۱۱</sup> (RDG) و SCB در سیستم قدرت با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های توان تولیدی RDGها و تقاضای انرژی خودروهای الکتریکی<sup>۱۲</sup> (EVها) در مرجع [۹] ارائه شده است. آن یک مسئله چندهدفه را بیان می‌کند که هزینه کل طرح و پایداری ولتاژ شبکه در توابع هدف آن مدنظر قرار گرفته‌اند. در مرجع [۱۰] نیز جایابی و اندازه‌یابی DGها و خازن‌ها متناسب با بهبود شرایط اقتصادی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه توزیع مدل‌سازی شده است. همچنین برنامه‌ریزی SCBها در شبکه توزیع به منظور بهبود وضعیت بهره‌برداری آن با در نظر گرفتن کمینه‌سازی تلفات انرژی و تابع انحرافات ولتاژ<sup>۱۳</sup> (VDF) در مرجع [۱۱] مطرح شده است، به طوری که جایابی و اندازه‌یابی بهینه SCBها باعث شده است که پروفیل ولتاژ صاف‌تری نسبت به مطالعات پخش توان برای سیستم توزیع به دست آید. در مرجع [۱۲] جایابی و اندازه‌یابی DG در شبکه توزیع قابل بازآرایی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس مرجع [۱۲] مشاهده می‌شود که برنامه‌ریزی بهینه DGها در کنار مسئله بازآرایی شبکه می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود وضعیت شاخص‌های بهره‌برداری شبکه از قبیل پروفیل ولتاژ داشته باشد. در مرجع [۱۳] علاوه بر برنامه‌ریزی DG، برنامه‌ریزی سیستم ذخیره‌سازی انرژی<sup>۱۴</sup> (ESS) در شبکه توزیع اکتیو مدل‌سازی شده است. در مرجع [۱۴] علاوه بر جایابی و اندازه‌یابی RDGها، برنامه‌ریزی کلیدها برای دستیابی به یک سیستم توزیع قابل بازآرایی نیز مطرح بوده است که این موضوع اثر قابل توجهی بر روی بهبود وضعیت قابلیت اطمینان سیستم دارد. در مرجع [۱۵] نیز مکان‌یابی DGها متناسب با روش تجزیه ارباب-رعیت<sup>۱۵</sup> در ریزشبکه<sup>۱۶</sup> بیان شده است، به طوری که برنامه‌ریزی DGها در مسئله ارباب قرار دارد، و مسئله رعیت شامل مدل بهره‌برداری ریزشبکه است. در نهایت خلاصه کارهای صورت گرفته در تحقیقات مختلف در جدول (۱) خلاصه شده است. با توجه به پیشینه تحقیق و جدول (۱)، شکاف‌های تحقیقاتی عمده زیر در ارتباط با برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه توزیع وجود دارد:

11. Renewable Distributed Generation (RDG)
12. Electric Vehicles (Evs)
13. Voltage Deviation Function (VDF)
14. Energy Storage System (ESS)
15. Master-Slave Decomposing Method
16. Micro-Grid

1. Smart Distribution Network (SDN)
2. Distribution System Operator (DSO)
3. Distributed Generations (Dgs)
4. Switched Capacitor Bank (SCB)
5. Demand Response Program (DRP)
6. Network Reconfiguration
7. Energy Management System (EMS)
8. Power Management System (PMS)
9. Voltage Security
10. Particle Swarm Optimization (PSO)

به منظور جبران شکاف‌های تحقیقاتی مطرح شده، این مقاله همانند شکل (۱) برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع اکتیو و راکتیو در SDN دارای قابلیت بازآرایی سیستم و بارهای پاسخ‌گو با در نظر گرفتن امنیت و لتاژ شبکه ارائه می‌دهد.



شکل (۱): چهارچوب طرح پیشنهادی

بنابراین طرح مذکور دارای یک چهارچوب بهینه‌سازی سه‌هدفه است که برای مدل‌سازی همزمان شاخص‌های اقتصادی، بهره‌برداری و امنیت SDN، توابع هدف اول تا سوم به ترتیب کمینه‌سازی مجموع هزینه سالیانه برنامه‌ریزی منابع و بهره‌برداری منابع و شبکه، کمینه‌سازی تابع انحرافات و لتاژ (VDF)، و بیشینه‌سازی شاخص امنیت و لتاژ (VSI) را بر عهده دارند. این مسئله مقید به معادلات بازآرایی و پخش توان بهینه AC شبکه، محدودیت امنیت و لتاژ سیستم، فرمول‌بندی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع اکتیو و راکتیو، و مدل بهره‌برداری طرح پاسخ‌گویی بار (DRP) است. در گام بعدی، تکنیک بهینه‌سازی پارتو بر پایه روش مجموع توابع وزندار به منظور تبدیل مسئله چندهدفه به یک مدل تک‌هدفه استفاده می‌شود. سپس روند حل مسئله مذکور مبتنی بر الگوریتم تکاملی ترکیبی (HEA) مانند حل‌کننده ترکیبی بهینه‌سازی دسته میگوها (KHO) و الگوریتم جست‌وجوی کلاغ (CSA) است؛ زیرا پیش‌بینی می‌شود که این الگوریتم به علت بهنگام‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله در دو فرایند KHO و CSA قادر باشد که راه‌حل بهینه مطمئن با انحراف معیار پایین را در زمان محاسباتی پایین به دست آورد. در نهایت نوآوری‌های طرح پیشنهادی به شرح زیر است:

3. Voltage Security Index (VSI)
4. Hybrid Evolutionary Algorithm (HEA)
5. Krill Herd Optimization (KHO)
6. Crow Search Algorithm (CSA)

- اکثر تحقیقات مسائل بهره‌برداری و برنامه‌ریزی SDN قابل بازآرایی را به صورت مجزا در نظر گرفته‌اند؛ ولی انتظار می‌رود که ترکیب این مسائل بتواند اثرگذاری بالاتری در بهبود شاخص‌های فنی و اقتصادی در SDN داشته باشد، در صورتی که این مورد در تحقیقات کمی مانند [۱۴-۱۵] در نظر گرفته شده است.
- بیشتر تحقیقات مانند [۱۵-۱۶] عموماً یک یا دو شاخص مطرح در SDN را به صورت همزمان مدل‌سازی می‌کنند؛ ولی بایستی گفت که بهبود وضعیت یک شاخص تضمینی در بهبود وضعیت شاخص دیگر ندارد. برای مثال، به منظور کمینه‌سازی هزینه انرژی SDN که یک شاخص اقتصادی برای شبکه محسوب می‌شود، نیاز به تزریق انرژی بالای منابع اکتیو محلی به شبکه مذکور است. ولی این موضوع در راستای کاهش تلفات انرژی و انحراف و لتاژ که از شاخص‌های بهره‌برداری SDN می‌باشند، نیست.
- مسئله مذکور ذاتاً دارای مدل غیرخطی عدد صحیح (MINLP) است، که بیشتر تحقیقات مانند [۱۵-۱۶] از الگوریتم تکاملی غیرترکیبی مانند PSO و الگوریتم ژنتیک (GA)، روش‌های ریاضی برای حل مسئله مذکور استفاده کرده‌اند. ولی روش تکاملی غیرترکیبی دارای انحراف معیار پاسخ‌دهی بالاست، و عموماً زمان محاسباتی روش‌های تکاملی غیرترکیبی و ریاضی بالا می‌باشد که آن‌ها در پاسخ‌دهی یکتا نیست.

جدول (۱): خلاصه کارهای انجام‌شده در پیشینه تحقیق

مرجع	شاخص		حل‌کننده	هماهنگی عناصر
	اقتصادی	بهره‌برداری امنیت		
[۶]	بله	خیر	NHEA	DG
[۷]	بله	بله	NHEA	DG
[۸]	بله	خیر	ریاضی	DG
[۹]	بله	خیر	NHEA	SCB و DG
[۱۰]	بله	بله	HEA	SCB و DG
[۱۱]	خیر	بله	ریاضی	SCB
[۱۲]	بله	بله	ریاضی	DRP و DG
[۱۳]	بله	بله	ریاضی	DG
[۱۴]	بله	خیر	ریاضی	DRP و DG
[۱۵]	بله	بله	NHEA	DG
طرح پیشنهادی	بله	بله	HEA	DRP, SCB, DG و بازآرایی سیستم

NHEA: Non-hybrid evolutionary algorithm, HEA: Hybrid evolutionary algorithm

1. Mixed Integer Non-Linear Programming (MINLP)
2. Genetic Algorithm (GA)

$$P_{n,h}^S + P_{n,h}^{DR} + \sum_{t \in \Theta_{DT}} P_{n,t,h}^{DG} - \sum_{j \in \Theta_N} A_{n,j} P_{n,j,h}^L = P_{n,h}^D \quad \forall n, h \quad (۴)$$

- مدل‌سازی همزمان مسائل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع اکتیو

و راکتیو در شبکه توزیع هوشمند قابل بازآرایی به صورت

$$Q_{n,h}^S + \sum_{t \in \Theta_{DT}} Q_{n,t,h}^{DG} + Q_{n,h}^{SC} - \sum_{j \in \Theta_N} A_{n,j} Q_{n,j,h}^L = Q_{n,h}^D \quad \forall n, h \quad (۵)$$

فرمول‌بندی چندهدفه؛

- در نظر گرفتن بهبود وضعیت شاخص‌های اقتصادی، بهره‌برداری

و امنیت ولتاژ شبکه توزیع هوشمند به صورت همزمان؛

$$P_{n,j,h}^L = \left\{ \begin{array}{l} G_{n,j}^L (V_{n,h})^2 - \\ V_{n,h} V_{j,h} \left( G_{n,j}^L \cos(\varphi_{n,h} - \varphi_{j,h}) \right. \\ \left. + B_{n,j}^L \sin(\varphi_{n,h} - \varphi_{j,h}) \right) \end{array} \right\} sw_{n,j,h} \quad (۶)$$

- استفاده از الگوریتم تکاملی ترکیبی KHO و CSA برای دستیابی به راه‌حل بهینه مطمئن با انحراف معیار پایین در پاسخ‌دهی.

در ادامه، مقاله بدین صورت سازمان‌دهی می‌شود: در بخش ۲

$$Q_{n,j,h}^L = \left\{ \begin{array}{l} -B_{n,j}^L (V_{n,h})^2 + \\ V_{n,h} V_{j,h} \left( B_{n,j}^L \cos(\varphi_{n,h} - \varphi_{j,h}) \right. \\ \left. - G_{n,j}^L \sin(\varphi_{n,h} - \varphi_{j,h}) \right) \end{array} \right\} sw_{n,j,h} \quad (۷)$$

فرمول‌بندی طرح پیشنهادی بیان می‌شود. در بخش سوم نیز روند حل

مسئله از قبیل مدل‌سازی تک‌هدفه طرح مذکور و روش حل آن

توسط الگوریتم تکاملی ترکیبی ارائه می‌شود. در نهایت نتایج عددی

حاصل از موارد مطالعاتی مختلف به‌علاوه نتیجه‌گیری به ترتیب در

بخش‌های ۴ و ۵ ذکر می‌شوند.

$$\varphi_{n,h} = 0 \quad \forall n = \text{Slack bus}, h \quad (۸)$$

$$\sqrt{(P_{n,j,h}^L)^2 + (Q_{n,j,h}^L)^2} \leq \bar{S}_{n,j}^L \quad \forall n, j, h \quad (۹)$$

## ۲. فرمول‌بندی مسئله پیشنهادی

مدل مسئله برنامه‌ریزی بهینه منابع اکتیو و راکتیو مقید به بهره‌برداری

امن<sup>۱</sup> (SO) در SDN در این بخش ارائه می‌شود. این مسئله به صورت

فرمول‌بندی بهینه‌سازی سه‌هدفه است که توابع هدف اول تا سوم

به منظور در نظر گرفتن شاخص‌های اقتصادی، بهره‌برداری و امنیت

SDN به ترتیب کمینه‌سازی هزینه برنامه‌ریزی، کمینه‌سازی تابع

انحرافات ولتاژ (VDF) و بیشینه‌سازی شاخص امنیت ولتاژ (VSI) را

در نظر می‌گیرند. همچنین طرح مذکور مقید به معادلات پخش توان

بهینه<sup>۲</sup> AC (AC-OPF)، مدل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع اکتیو و

راکتیو، فرمول‌بندی بازآرایی SDN و بهره‌برداری DRP و محدودیت

امنیت SDN است. بنابراین طرح پیشنهادی به صورت زیر مدل‌سازی

می‌شود:

$$\min Cost = \underbrace{\sum_{n \in \Theta_N} IC_n^{SC} x_n^{SC}}_{\text{Annual planning cost}} + \underbrace{\sum_{t \in \Theta_{DT}} IC_{n,t}^{DG} S_{n,t}^{DG}}_{\text{Annual operation cost}} \quad (۱)$$

$$+ 365 \times \sum_{h \in \Theta_{ST}} \left( \sum_{n \in \Theta_N} \left( \lambda_h^S P_{ref,h}^S + \alpha_n + \beta_n P_{n,h}^{DG} + \gamma_n (P_{n,h}^{DG})^2 \right) \right) \quad (۲)$$

$$\min VDF = \sum_{n \in \Theta_N} \sum_{h \in \Theta_{ST}} (V_{n,t} - 1)^2 \quad (۳)$$

$$\max VSI = \sum_{h \in \Theta_{ST}} WSI_h \quad (۴)$$

منوط به:

$$WSI_h = (V_{p-1,h})^4 \quad (۲۲)$$

$$-4(V_{p-1,h})^2 \left\{ R_{p-1,p} (P_{p-1,p,h}^L) + X_{p-1,p} (Q_{p-1,p,h}^L) \right\}$$

$$-4 \left\{ \left( X_{p-1,p} (P_{p-1,p,h}^L) - R_{p-1,p} (Q_{p-1,p,h}^L) \right)^2 \right\} \quad \forall h$$

$$WSI_h \geq \underline{WSI} \quad \forall h \quad (۲۳)$$

1. Securable Operation (SO)

2. AC Optimal Power Flow (AC-OPF)

مدل‌سازی شده است. در نهایت، رابطه (۱۴) معرف محدودیت اندازه برای DG است. این قید می‌تواند بیانگر جایابی و اندازه‌یابی بهینه برای DG باشد، زیرا اگر مقدار  $S^{DG}$  برای باس  $n$  برابر صفر باشد، یعنی اینکه نصب DG در این باس مقرون به صرفه نیست. ولی اگر آن در این باس مقدار داشته باشد، بدین معنی است که نصب DG با اندازه تعیین شده در این باس جهت برآورد شاخص‌های اقتصادی و فنی لازم است. مدل عملکرد SCBها در روابط (۱۵) تا (۱۷) ذکر شده، که این معادلات به ترتیب معرف میزان توان راکتیو تزریقی SCB به SDN، محدودیت تغییرات پله SCB و محدودیت اندازه SCB از نظر تعداد پله‌های عملکرد است.

مدل بهره‌برداری بار اکتیو از نوع DRP در (۱۸) و (۱۹) فرمول‌بندی شده است [۱۸]. در این مقاله از DRP بر پایه تشویق استفاده می‌شود، به طوری که مصرف‌کنندگانی که در این طرح مشارکت دارند، می‌توانند درصدی از انرژی مصرفی خود را در ساعات قیمت انرژی بالا (متناظر با ساعات پیک بار) به ساعت قیمت انرژی ارزان (متناسب با ساعات کم‌باری) انتقال دهند [۱۸]. بنابراین انتظار می‌رود که DRP پیشنهادی بتواند قدم مؤثر در اهداف پیک‌سایی SDN که یکی از عوامل بهبود شاخص‌های فنی و اقتصادی شبکه توزیع است، بردارد [۱۸]. پیرو این موضوع، رابطه (۱۸) محدودیت تغییرات توان در DRP را بیان می‌کند و قید (۱۹) تضمین‌کننده این موضوع است که انرژی مصرفی کاهش یافته مصرف‌کنندگان در ساعات پرباری بایستی در ساعات کم‌باری تأمین شود. شایان ذکر است که یکی دیگر از برنامه‌های مدیریتی شبکه توزیع برای بهبود شاخص‌های فنی و اقتصادی، بازآرایی SDN است. در این استراتژی با عملکرد بهینه کلیدهای سوارشده بر خطوط توزیع مختلف و تای لاین‌ها به شرطی که ساختار شعاعی SDN همواره رعایت شود، می‌توان وضعیت شاخص‌های بهره‌برداری، امنیت و اقتصادی را بهبود داد [۱۹]. قیود بازآرایی SDN در رابطه‌های (۲۰) و (۲۱) بیان شده است که به ترتیب بیانگر محدودیت تعداد عملکرد کلیدها و محدودیت متناسب با برقراری ساختار شعاعی SDN هستند. در نهایت، قیود امنیت ولتاژ SDN در روابط (۲۲) و (۲۳) ارائه شده است، به طوری که میزان WSI برای ضعیف‌ترین باس از نظر دامنه ولتاژ در رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود و در قید (۲۳) محدودیت این شاخص منظور می‌شود [۱۷].

### ۳. روند حل

مسئله ارائه‌شده در بخش قبل دارای فرمول‌بندی چندهدفه است که حل آن نیاز به استخراج مدل‌سازی تک‌هدفه دارد. برای این منظور،

توابع هدف مسئله پیشنهادی در روابط (۱) تا (۳) ارائه شده‌اند، به طوری که رابطه (۱) کمینه‌سازی مجموع هزینه سالیانه نصب DGها و SCBها به علاوه هزینه سالیانه بهره‌برداری SDN و DGها به منظور مدل‌سازی شاخص اقتصادی شبکه توزیع را بر عهده دارد [۲]. همچنین در رابطه (۲)، کمینه‌سازی VDF برای بهبود وضعیت بهره‌برداری SDN مدنظر است [۱۶]؛ زیرا بر اساس رابطه مذکور، انحراف (افت) ولتاژ در خطوط توزیع کاهش می‌یابد و پیرو آن تلفات شبکه نیز کاهش خواهد یافت و پروفیل ولتاژ صاف‌تری برای SDN قابل دسترس است، که این موارد جزء شاخص‌های بهره‌برداری یک شبکه است [۱۶]. در ادامه، رابطه (۳) بیانگر بیشینه‌سازی امنیت ولتاژ SDN است. به عبارتی دیگر در این مقاله، بدترین شاخص امنیت (WSI) برای ضعیف‌ترین باس از نظر مقدار دامنه ولتاژ ( $p$ ) محاسبه می‌شود. همچنین مقدار WSI بین صفر و ۱ قرار دارد که فروپاشی ولتاژ متناسب با مقدار صفر WSI است و مقدار یک آن به معنی شرایط بی‌باری SDN است [۱۷]. لذا به منظور دستیابی به امنیت ولتاژ بالا در SDN نیاز است که VSI همانند رابطه (۳) بیشینه شود.

قیود AC-OPF برای SDN در قیود (۴) تا (۱۱) بیان شده است [۵]. قیود (۴) تا (۸) اشاره به معادلات پخش توان  $AC-PF$  این شبکه دارد که به ترتیب معرف تعادل توان اکتیو و راکتیو در هر باس، (۴) و (۵)، توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط توزیع، (۶) و (۷)، زاویه ولتاژ باس مرجع، (۸)، می‌باشند [۱۷]. قیود (۹) تا (۱۱) به محدودیت‌های بهره‌برداری SDN اشاره دارد که شامل محدودیت ظرفیت خط و پست توزیع، (۹) و (۱۰)، و محدودیت دامنه ولتاژ باس‌ها، (۱۱)، است [۱۶]. قابل توجه است که در مسئله فرض بر این است که SDN از طریق پست توزیع متصل شده به باس مرجع به شبکه بالادست اتصال دارد. بنابراین میران متغیرهای  $P^S$  و  $Q^S$  در باس‌های دیگر برابر صفر است.

مدل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع اکتیو و راکتیو شامل DGها و SCBها در روابط (۱۲) تا (۱۷) بیان شده است. قیود (۱۲) تا (۱۴) بیان‌کننده مدل ریاضی DGهاست، به طوری که در رابطه (۱۲) محدودیت ظرفیت آن‌ها ارائه شده است. قابل توجه است که میزان توان اکتیو DGهای تجدیدپذیر (RDGها) به علت هزینه بهره‌برداری بسیار پایین آن‌ها، عموماً برابر با حداکثر توان اکتیو تولیدی آن‌ها متناسب با شرایط آب‌وهوایی است، که این موضوع در رابطه (۱۳)

مبنی بر روش تصمیم‌گیری فازی جهت تعیین نقطه مصالحه مابین توابع هدف مختلف استفاده می‌شود [۲۰-۲۱]. از مزایای این رابطه، روند ساده محاسبات و همچنین دقت آن است [۲۰-۲۱]. در گام بعدی، بر اساس [۲۱]، بایستی حداقل مقدار مجموعه  $\{\hat{f}_{OC}, \hat{f}_{VDF}, \hat{f}_{VSI}\}$  به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب وزنی  $\omega_{vsi}$ ،  $\omega_{vdf}$ ،  $\omega_{cost}$  عبارت  $f_m$  در نظر گرفته می‌شود، که  $m$  نیز معرف تعداد کل مراحل تغییرات مقادیر ضرایب وزنی مذکور است. در ادامه، بهترین راه‌حل مصالحه توابع هدف پیشنهادی بر اساس [۲۱] متناظر با بیشینه‌ترین مقدار  $f$  خواهد بود.

مسئله (۲۳) تا (۲۹) دارای مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح (MINLP) است که این مقاله از الگوریتم ترکیبی KHO [۲۲] و CSA [۲۳] برای حل مسئله مذکور استفاده می‌کند. تعداد مراحل بهنگام‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری در این حل‌کننده برابر ۲ است، یعنی فرایند KHO و سپس فرایند CSA؛ لذا پیش‌بینی می‌شود که این الگوریتم قادر باشد که راه‌حل بهینه مطمئن با انحراف معیار پایین در پاسخ‌دهی را به دست آورد. در این طرح، متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله پیشنهادی شامل  $P^{DG}$ ،  $Q^{DG}$ ،  $P^{DR}$ ،  $Q^{DR}$  و  $\gamma$  است. همچنین مقادیر این متغیرها به ترتیب بر اساس محدوده‌های  $[0, S^{DG}]$ ،  $[0, S^{DR}]$ ،  $[0, 1]$ ،  $[0, 1]$ ،  $[0, 1]$  و  $[0, 1]$  قیود (۱۶) و (۱۷) مشخص می‌کند. در ادامه، میزان متغیر وابسته  $Q^{SC}$  از قیود (۱۵) تعیین می‌گردد، سپس مقادیر متغیرهای وابسته  $P^S$ ،  $Q^S$ ،  $P^L$ ،  $Q^L$  و  $V$  و  $\varphi$  بر اساس آنالیز پخش بار، قیود (۴) تا (۸)، بر پایه روش پرسو-پیشرو [۲۴] محاسبه می‌شوند. در نهایت متغیرهای  $VDF$ ،  $Cost$ ،  $VSI$  و  $VDF$  به ترتیب متناسب با قیود (۲۲) و (۲۵) تا (۲۷) محاسبه می‌شوند. در این مقاله، قیود (۹) تا (۱۲)، (۱۹) تا (۲۱) و (۲۳) متناظر با روش تابع جریمه برآورده می‌شوند [۲۵]. به عبارتی تابع جریمه آن‌ها به تابع هدف مسئله یعنی (۲۳) اضافه می‌شوند که به این تابع جدید، تابع برازندگی گفته می‌شود. قابل توجه است که تابع جریمه برای محدودیت  $a \leq b$  به صورت  $\mu \cdot \max(0, a - b)$  است و آن برای قید  $a = b$  به صورت  $\lambda \cdot (a - b)$  می‌باشد [۲۵]. عبارت‌های  $\mu \geq 0$  و  $\lambda \in (-\infty, +\infty)$  معرف ضرایب لاگرانژ هستند که مقادیر آن‌ها توسط الگوریتم CSA+KHO مشخص می‌شود.

در این مقاله از تکنیک بهینه‌سازی پارتو مبنی بر روش مجموع توابع وزن‌دار استفاده می‌شود [۲۰]. بر اساس این تکنیک فرمت مسئله تک‌هدفه برای طرح پیشنهادی به صورت مدل (۲۴) تا (۲۹) خواهد بود. به عبارتی در این روش، تابع هدف مسئله جدید ( $F$ ) همانند رابطه (۲۴) برابر مجموع توابع هدف  $VDF$ ،  $Cost$  و  $VSI$  خواهد بود که به ترتیب با ضرایب  $\omega_{vdf}$ ،  $\omega_{cost}$  و  $\omega_{vsi}$  در این تابع ظاهر می‌شوند. بر اساس مسئله (۱) تا (۲۳)، توابع  $VDF$ ،  $Cost$  و  $VSI$  از قیود (۲۵) تا (۲۷) قابل محاسبه هستند. همچنین در تکنیک مذکور بایستی همانند قید (۲۸)، مجموع ضرایب وزنی مذکور برابر با ۱ باشد [۲۴]. در نهایت، قیود مسئله چندهدفه پیشین همانند قید (۲۹) در فرمول‌بندی تک‌هدفه جدید در نظر گرفته می‌شود.

$$\min F = \omega_{cost} Cost + \omega_{vdf} VDF - \omega_{vsi} VSI \quad (24)$$

منوط به:

$$Cost = \sum_{n \in \Theta_N} IC_n^{SC} x_n^{SC} + \sum_{t \in \Theta_{DT}} IC_{n,t}^{DG} S_{n,t}^{DG} \quad (25)$$

$$+ 365 \times \sum_{h \in \Theta_{ST}} \left( \lambda_n P_{ref,h}^S + \sum_{n \in \Theta_N} \alpha_n + \beta_n P_{n,h}^{DG} + \gamma_n (P_{n,h}^{DG})^2 \right)$$

$$VDF = \sum_{n \in \Theta_N} \sum_{h \in \Theta_{ST}} (V_{n,t} - 1)^2 \quad (26)$$

$$VSI = \sum_{h \in \Theta_{ST}} WSI_h \quad (27)$$

$$\omega_{cost} + \omega_{vdf} + \omega_{vsi} = 1 \quad (28)$$

قیود (۴) تا (۲۳)

شایان ذکر است که به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب  $\omega_{vdf}$ ،  $\omega_{cost}$  و  $\omega_{vsi}$  مقادیر متفاوتی برای توابع  $VDF$ ،  $Cost$  و  $VSI$  به دست خواهد آمد که رسم این نقاط در یک مختصات سه‌بعدی بیانگر جهت پارتو برای طرح پیشنهادی است؛ ولی در ادامه برای دستیابی به یک نقطه بهینه مصالحه مابین توابع مذکور، این مقاله از روش تصمیم‌گیری فازی استفاده می‌کند [۲۱]. در این تکنیک، ابتدا تابع عضویت فازی خطی ( $\hat{f}$ ) بر اساس معادله (۳۰) برای توابع اشاره‌شده به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب وزنی مذکور محاسبه می‌شود [۲۱].

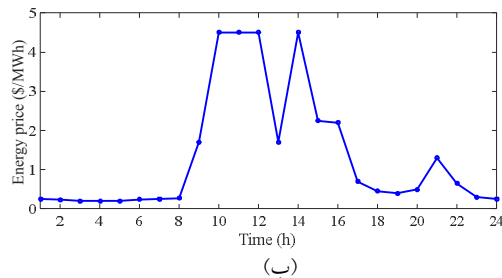
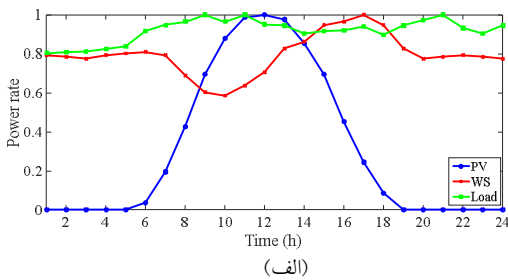
$$\hat{f}_i = \begin{cases} 1 & f_i \leq \underline{f}_i \\ \frac{f_i - \underline{f}_i}{\bar{f}_i - \underline{f}_i} & \underline{f}_i \leq f_i \leq \bar{f}_i \\ \frac{\bar{f}_i - f_i}{\bar{f}_i - \underline{f}_i} & \bar{f}_i \leq f_i \leq \bar{f}_i \\ 0 & \bar{f}_i \leq f_i \end{cases} \quad (30)$$

که  $\underline{f}$  و  $\bar{f}$  بیانگر حداکثر و حداقل مقدار توابع هدف مختلف است. این مقادیر در صورت حل مسئله (۲۳) تا (۲۹) به‌ازای سه حالت  $\omega_{cost} = 1$ ،  $\omega_{vdf} = 1$  و  $\omega_{vsi} = 1$  قابل تعیین است. بایستی گفت که رابطه (۳۰) در بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه

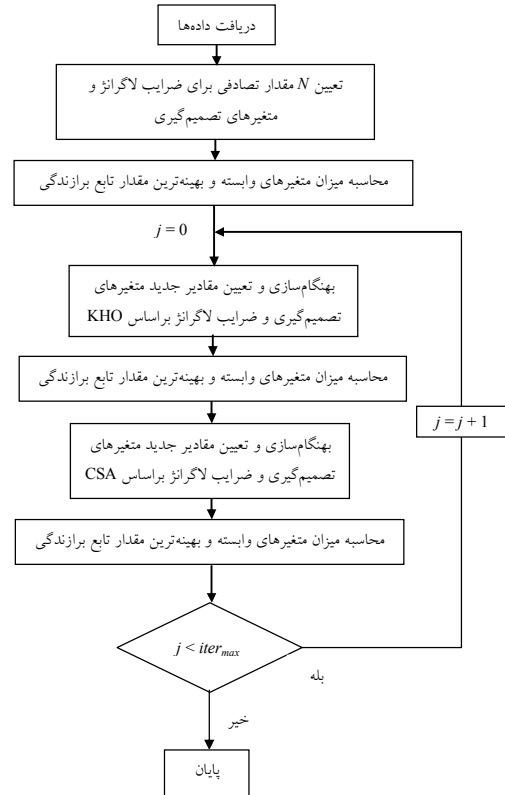
#### ۴. نتایج عددی

##### ۴.۱. مورد مطالعاتی

مسئله ارائه شده در بخش های قبل در این بخش بر روی SDN شعاعی ۶۹ باسه اجرا خواهد شد که اطلاعات شبکه شامل خطوط و پست توزیع به علاوه پیک بار در [۲۶] بیان شده است. محدوده مجاز دامنه ولتاژ شبکه مذکور بر اساس توان و ولتاژ مبنای ۱ MVA و ۱۲/۶۶ kV برابر [۹/۰، ۱/۱] پریونیت است. پروفیل روزانه بار این شبکه برابر با حاصل ضرب پیک بار و منحنی روزانه ضریب بار (شکل ۳-الف [۲۷]) است. همچنین قیمت انرژی روزانه در این شبکه متناسب با شکل (۳-ب) می باشد [۲۸]. علاوه بر این، شبکه مذکور دارای چهار نوع DG شامل سیستم بادی (WS)، فتولتائیک (PV)، پیل سوختی (FC) و میکروتوربین (MT) است که مشخصات آن در جدول (۲) ارائه شده است [۲۸]. همچنین منحنی روزانه توان اکتیو WS و PV برابر با حاصل ضرب ظرفیت آن ها و منحنی نرخ توان روزانه این منابع همانند شکل (۳-الف) است [۲۷]. هر SCB با هزینه نصب \$/step/year ۴۰۰۰۰ می تواند دارای حداکثر ۱۰ پله عملکرد باشد که در هر پله، آن ۰/۱ پریونیت توان راکتیو به SDN تزریق می کند. در ارتباط با DRP، فرض بر این است که همه مصرف کنندگان قادرند که در این طرح با ضریب مشارکت ۳۰٪ شرکت کنند. همچنین تعداد مجاز کلیدزنی کلیدهای سوار شده بر خطوط توزیع برابر ۱۴ است [۱۹] و حداقل مقدار مجاز WSI برابر ۰/۸ [۱۷].



شکل (۳): منحنی روزانه، الف) ضریب بار شبکه و نرخ توان منابع تجدیدپذیر [۲۷]، ب) قیمت انرژی [۲۸]



شکل (۲): روندنمای الگوریتم CSA+KHO برای حل مسئله پیشنهادی

- در نهایت مراحل حل مسئله با الگوریتم مذکور متناسب با روندنمای شکل (۲) است و جزئیات آن به شرح زیر می باشد:
- **گام اول:** الگوریتم CSA+KHO به تعداد مشخصی مثلاً  $N$  که تحت اندازه جمعیت شناخته می شود، مقدار تصادفی برای متغیرهای تصمیم گیری و ضرایب لاگرانژ را بر اساس محدوده مجاز آن ها به دست می آورد.
  - **گام دوم:** میزان متغیرهای وابسته و در ادامه میزان تابع برازندگی تعیین می شود.
  - **گام سوم:** مراحل بهنگام سازی متغیرهای تصمیم گیری بر اساس بهترین مقدار تابع برازندگی در مرحله قبل اجرا می شود. برای این منظور، ابتدا فرایند KHO اجرا و سپس فرایند CSA استفاده می گردد. در هر مرحله بهنگام سازی متغیرهای تصمیم گیری، میزان متغیرهای وابسته و تابع برازندگی بر اساس مباحث مطرح شده در این بخش محاسبه می شوند.
  - **گام چهارم:** تکرار مراحل بهنگام سازی تا دستیابی به شرایط همگرایی تکرار می شود، به طوری که در این مقاله فرض بر این است که شرایط همگرایی بعد از تعداد تکرار مشخصی تحت عبارت  $iter_{max}$  قابل دسترس است.



جدول (۲): مشخصات DGها [۲۸]

ظرفیت قابل نصب (MVA)	هزینه بهره‌برداری			هزینه نصب سالانه (\$/MVA/year)	نوع	DG
	$\gamma$ (\$/kWh <sup>2</sup> )	$\beta$ (\$/kWh)	$\alpha$ (\$)			
۱	۰	۰	۰	۲/۱	WS	۱
۱	۰	۰	۰	۱/۸	PV	۲
۱	۰/۰۰۰۰۰۰۲	۰/۲۹۴	۱/۶۵	۲	FC	۳
۱	۰۰۰۰۰۰۲۵	۰/۴۵۷	۰/۹۶	۱/۵	MT	۴

## ۲.۴. نتایج

طرح پیشنهادی در محیط نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده است و سپس نتایج عددی حاصل از موارد مطالعاتی مختلف در ادامه ارائه می‌شود.

**الف. بررسی قابلیت الگوریتم حل پیشنهادی:** نتایج جبهه پارتو به چهار مقدار صفر، ۰/۳۳، ۰/۵ و ۱ برای هرکدام از ضرایب وزن دار  $\omega_{vsi}$ ،  $\omega_{vdf}$  و  $\omega_{cost}$  برای طرح پیشنهادی در جدول (۳) ارائه شده است. در این جدول، حداکثر و حداقل مقدار توابع هدف Cost، VSI و VDF بر اساس حالت‌های  $\omega_{vsi} = 1$ ،  $\omega_{vdf} = 1$ ،  $\omega_{cost} = 1$  = در سطوح دوم تا چهارم قابل مشاهده است، به طوری که حداقل و حداکثر مقدار تابع Cost به ترتیب برابر ۴۰/۱۵ و ۴۷/۱۰ میلیون دلار بر سال است. این مقادیر برای VDF برابر ۶/۰۴ و ۲۹/۱۱ پرونیوت و برای VSI برابر ۲۰/۲۹ و ۲۲/۹۳ است. بر اساس این جدول دیده می‌شود که جهت افزایش و کاهش یک تابع در راستای توابع دیگر نیست، به طوری که بهینه‌ترین (کمینه‌ترین) مقدار Cost به ازای بدترین مقادیر VSI و VDF قابل دسترس است. این موضوع نیز برای توابع دیگر برقرار است. در نهایت با توجه به چنین شرایطی، روش تصمیم‌گیری فازی که روند آن در بخش ۳ ارائه شد، قادر است بهترین پاسخ مصالحه را همانند جدول (۴) گزارش کند. در این جدول از الگوریتم‌های KHO، KHO+CSA، CSA، معادلات تفاضلی (DE) [۲۹] و PSO [۶] برای حل مسئله پیشنهادی استفاده شده است. فرض شده است اندازه جمعیت و حداکثر تکرار همگرایی برای الگوریتم‌های ذکر شده به ترتیب برابر ۴۰ و ۲۰۰۰ هستند و بقیه پارامترهای تنظیم این حل‌کننده بر اساس [۲۲-۲۳، ۲۹] انتخاب شده‌اند. همچنین برای محاسبه شاخص‌های آماری مانند انحراف معیار، هر الگوریتم مسئله را ۲۰ بار حل می‌کند. در ادامه توجه شود که بر اساس این جدول، الگوریتم KHO+CSA قادر است که بهینه‌ترین مقدار را برای توابع هدف Cost، VSI و VDF نسبت به دیگر الگوریتم‌های یاد شده به دست آورد. این حل‌کننده شرایط مذکور را در تکرار همگرایی (CI) ۶۲۱

که متناظر با زمان محاسباتی (CT) ۹۸/۲۲ ثانیه است، به دست آورده است. در صورتی که دیگر الگوریتم‌ها پاسخ بهینه را در تکرار همگرایی بیش از ۸۳۰ و زمان محاسباتی بیش از ۱۴۰ ثانیه پیدا کرده‌اند. پس سرعت حل مسئله توسط الگوریتم KHO+CSA نسبت به دیگر حل‌کننده‌ها بیشتر است. توجه شود که مسائل بهره‌برداری بهینه شبکه الکتریکی به علت استفاده از معادلات پخش توان دارای یک مسئله غیرمحدب هستند [۱ و ۵]. از این رو حل‌کننده‌های آن در بهترین شرایط دارای پاسخ بهینه محلی هستند. ولی الگوریتم KHO+CSA بر اساس جدول (۴) دارای بهینه‌ترین وضعیت نسبت به دیگر الگوریتم‌هاست. پس می‌توان بیان کرد که این الگوریتم توانسته است در نقطه بهینه محلی نزدیک‌تر به نقطه بهینه مطلق نسبت به دیگر الگوریتم‌ها توقف یابد. علاوه بر این، الگوریتم KHO+CSA دارای انحراف معیار (SD) ۰/۹۴٪ است که نسبت به دیگر حل‌کننده مقدار پایینی دارد. این بدین معنی است که پراکندگی پاسخ نهایی مسئله پیشنهادی توسط این الگوریتم بسیار پایین است؛ از این رو آن دارای شرایط تقریبی پاسخ‌دهی یکناست. در نهایت، بر اساس نتایج به دست آمده توسط الگوریتم KHO+CSA متناسب با گزارش جدول (۴) می‌توان بیان کرد که مقدار بهینه توابع مذکور در بهترین راه حل مصالحه نزدیک به بهینه‌ترین مقدار آن در جدول (۳) است، به طوری که فاصله مقدار Cost در بهترین نقطه مصالحه نسبت به بهینه‌ترین مقدار خود در حدود ۲/۲٪ (۴۰/۱۵/۴۰/۱۵ - ۴۱/۰۳) است. این مقدار برای دو تابع VDF و VSI به ترتیب برابر ۸/۴٪ و ۲/۱٪ خواهد بود.

جدول (۳): جبهه پارتو برای طرح پیشنهادی

VSI	VDF (p.u)	Cost (M\$/year)	$\omega_{vsi}$	$\omega_{vdf}$	$\omega_{cost}$
۲۰/۲۹	۲۹/۱۱	۴۰/۱۵	۰	۰	۱
۲۱/۹۸	۶/۰۴	۴۷/۱۰	۰	۱	۰
۲۲/۹۳	۷/۰۵	۴۶/۳۴	۱	۰	۰
۲۱/۴۳	۶/۹۷	۴۱/۵۶	۰	۰/۵	۰/۵
۲۲/۱۷	۷/۵۸	۴۱/۲۲	۰/۵	۰	۰/۵
۲۲/۷۲	۶/۲۱	۴۶/۶۱	۰/۵	۰/۵	۰
۲۲/۲۱	۶/۸۱	۴۲/۴۵	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳



جدول (۴): نتایج بهترین راه مصالحه به دست آمده از الگوریتم های مختلف

حل کننده	Cost (M\$/year)	VDF (p.u)	VSI	CI	CT (s)	SD (%)
KHO+CSA	۴۱/۰۳	۶/۵۵	۲۲/۴۴	۶۲۱	۹۸/۲۲	۰/۹۴
KHO	۴۱/۸۸	۶/۶۳	۲۲/۳۶	۸۳۱	۱۴۲/۱۵	۱/۴۵
CSA	۴۲/۴۵	۶/۶۶	۲۲/۳۱	۸۹۳	۱۵۱/۳۷	۱/۵۱
DE	۴۳/۰۸	۶/۸۱	۲۲/۱۶	۱۱۰۷	۱۷۲/۷۱	۲/۶۳
PSO	۴۳/۵۹	۶/۹۴	۲۲/۰۲	۱۷۱۱	۱۸۹/۲۳	۳/۰۸

جدول (۵): نتایج برنامه ریزی منابع اکتیو و راکتیو

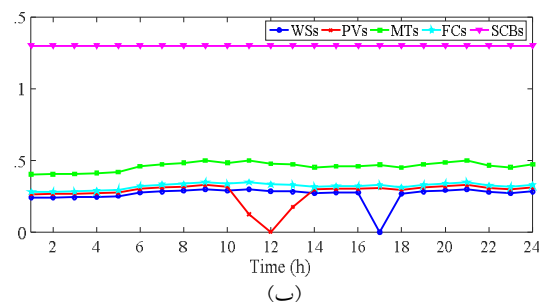
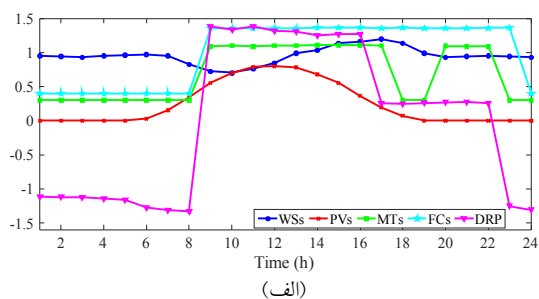
منبع	مکان (باس)	ظرفیت در مکان بهینه (MVA)	کل ظرفیت نصب شده (MVA)	هزینه برنامه ریزی (M\$/year)
PV	۶۷، ۳۱	۰/۴، ۰/۴	۰/۸	۱/۴۴
WS	۲۲، ۶	۰/۵۵، ۰/۶۵	۱/۲	۲/۵۲
MT	۶۲، ۲۳	۰/۶، ۰/۶	۱/۲	۱/۸
FC	۵۳، ۱۶	۰/۷، ۰/۷	۱/۴	۲/۸
SCB	۶۵، ۲۷	۰/۸، ۰/۵	۱/۳	۰/۵۲
		هزینه کل (M\$/year)		۹/۰۸

ب. نتایج برنامه ریزی و بهره برداری منابع اکتیو و راکتیو: نتایج

برنامه ریزی منابع اکتیو و راکتیو مانند DGها و SCBها در جدول (۵) گزارش شده است. با توجه به این جدول، بیشترین ظرفیت قابل نصب برای DG از نوع پیل سوختی و کمترین ظرفیت نصب شده DG مربوط به نوع فتوولتائیک است زیرا فتوولتائیکها بر اساس شکل (۳-الف) در بیشتر ساعات خاموش هستند؛ پس از نظر مقادیر بهینه توابع Cost، VDF و VSI به صرفه نیست که ظرفیت بالایی برای این نوع DG احداث شود. علاوه بر این، اکثر DGها در باس های انتهایی فیدر مانند ۲۳، ۶۲ و ۶۷، یا ابتدای فیدر مانند ۱۶ و ۵۳ نصب می شوند. DGهایی که در باس هایی انتهایی فیدرها قرار دارند، عموماً ظرفیت پایین تری نسبت به DGهای قرار گرفته در باس های ابتدای فیدر دارند زیرا بر اساس داده های شبکه توزیع ۶۹ باسه، خطوط توزیع انتهایی فیدر دارای ظرفیت پایینی هستند؛ از این رو به منظور رعایت قید (۹)، ظرفیت پایینی برای DGهای نصب شده در باس های انتهایی فیدرها در نظر گرفته می شود. شایان ذکر است که SCBها نیز در باس های انتهایی فیدرها مثل باس ۲۷ و ۶۵ نصب می شوند زیرا SCBها به علت کنترل توان راکتیو قادر هستند که ولتاژ باس های ضعیف از نظر دامنه ولتاژ را بهبود دهند. بر اساس مطالعات پخش توان شبکه توزیع ۶۹ باسه [۳۱]، کمترین دامنه ولتاژ در باس های ۲۷ و ۶۵ وجود دارد؛ از این رو در این باس ها SCB نصب می شود که بتواند توابع هدف VDF و VSI را بهبود دهند. در نهایت با توجه به این موارد، مجموع هزینه نصب DGها برابر ۸/۵۶ میلیون دلار (۱/۴۴ + ۲/۵۲ + ۱/۸۰ +

۲/۸۰) و مجموع هزینه نصب SCBها برابر ۰/۵۲ M\$ است. در نهایت با صرف هزینه ۹/۰۸ میلیون دلاری برای نصب منابع اکتیو و راکتیو، می توان به مقادیر بهینه توابع Cost، VDF و VSI همانند نتایج جدول (۵) دست یافت.

نتایج بهره برداری منابع اکتیو و راکتیو به علاوه در شکل (۴) نمایش داده شده است. شکل (۴-الف) منحنی روزانه توان اکتیو DGها و DRP را نشان می دهد. بر اساس این شکل و شکل (۳-الف) مشاهده می شود که WSها و PV توان اکتیو برابر با حداکثر ظرفیت خود به شبکه تزریق می کنند، زیرا هزینه بهره برداری آنها بر اساس جدول (۲) برابر صفر است؛ از این رو به منظور دستیابی به کمینه ترین نقطه Cost لازم است آنها توان اکتیو بالایی را SDN تزریق کنند. علاوه بر این، FFCها و MTها در ساعاتی که قیمت سوخت آنها کمتر از قیمت انرژی ارائه شده در شکل (۳-ب) است، توان اکتیو بالایی را برای کمینه سازی تابع Cost به شبکه تزریق می کنند. در صورتی که در ساعاتی که قیمت انرژی بیش از قیمت سوخت آنهاست، آنها توان اکتیو کمتری را برای بهبود توابع Cost، VDF و VSI به شبکه تزریق می کنند. علاوه بر این، منحنی روزانه توان اکتیو DRPها در شکل (۴-الف) ارائه شده است. بر اساس این شکل، مصرف کنندگان در ساعات کم باری ۱:۰۰ تا ۸:۰۰ و ۲۳:۰۰ تا ۲۴:۰۰ مصرف خود را افزایش می دهند تا اینکه بتوانند در دیگر ساعات که بر اساس شکل (۳-الف) میزان مصرف شبکه بالاست، توان مصرفی خود را برای بهبود توابع Cost، VDF و VSI کاهش دهند.



شکل (۴): منحنی روزانه، الف) توان اکتیو، ب) توان راکتیو عناصر

مختلف در SDN

جدول (۶): نتایج اقتصادی و فنی SDN						
VI	V	IV	III	II	I	مورد مطالعاتی
۳۱/۹۵	۳۲/۲	۴۹/۱	۵۰/۱	۴۸/۷	۵۱/۳	هزینه بهره‌برداری (M\$/year)
۹/۰۸	۱۲/۳	۰/۸	۰	۰	۰	هزینه برنامه‌ریزی (M\$/year)
۴۱/۰۳	۴۴/۵	۴۹/۹	۵۰/۱	۴۸/۷	۵۱/۳	کل هزینه (M\$/year)
۲۲/۴۴	۲۱/۵۵	۲۱/۰۳	۲۰/۷۹	۲۱/۰۸	۲۰/۱۲	VSI
۳/۰۵	۳/۲۸	۴/۶۷	۴/۸۱	۳/۷۲	۵/۰۸	انرژی تلفاتی (MWh)
۰/۰۴۴	۰/۰۴۷	۰/۰۵۲	۰/۰۸۳	۰/۰۶۴	۰/۰۹۲	حداکثر افت ولتاژ (p.u)
۰/۰۲۱	۰/۰۲۵	۰/۰۱۱	۰	۰	۰	حداکثر اضافه ولتاژ (p.u)

در جدول (۶) مقادیر مورد انتظار شاخص‌های بهره‌برداری مانند انرژی تلفاتی، حداکثر افت ولتاژ و حداکثر اضافه ولتاژ در SDN ارائه شده است. بر اساس این شکل، مورد VI که حضور همه منابع اکتیو و راکتیو و استراتژی بازآرایی شبکه را در نظر می‌گیرد، توانسته است کمترین تلفات انرژی و افت ولتاژ را نسبت به دیگر موارد مطالعاتی به دست آورد، ولی آن برای دستیابی به این شرایط نیاز به ایجاد حداکثر اضافه ولتاژ ۰/۰۲۱ پریونت دارد. همچنین بر اساس این جدول، DG موجب کاهش تلفات انرژی و افت ولتاژ می‌شود، ولی باعث ایجاد اضافه ولتاژ نیز می‌شود. SCB تأثیر قابل توجهی بر کاهش افت ولتاژ دارد، ولی آن نیز اضافه ولتاژ در SDN ایجاد می‌کند. DRP و بازآرایی نیز تأثیر قابل توجهی بر کاهش افت ولتاژ و تلفات انرژی دارند، ولی موجب ایجاد اضافه ولتاژ در SDN نمی‌شوند. در نهایت می‌توان بیان کرد که طرح پیشنهادی با برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع مختلف در SDN قابل بازآرایی قادر است که هزینه را در حدود ۲۰٪ (۵۱/۳ - ۴۱/۰۳) نسبت به مطالعات پخش بار شبکه کاهش دهد. همچنین آن مقدار VSI شبکه را در حدود ۱۱/۵٪ نسبت به آنالیز پخش بار SDN ارتقا داده است. در ارتباط با شاخص‌های بهره‌برداری، تلفات انرژی سالیانه و حداکثر افت ولتاژ به ترتیب در طرح پیشنهادی نسبت به مورد I در حدود ۴۰٪ و ۵۲/۱٪ کاهش یافته‌اند. بنابراین طرح پیشنهادی شرایط اقتصادی، بهره‌برداری و امنیت SDN را نسبت به مورد I به ترتیب در حدود ۲۰، ۴۶ (۲ + ۴۰)٪ و ۱۱/۵٪ ارتقا داده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

این مقاله برنامه‌ریزی و بهره‌برداری DGها و SCBها را در SDN دارای بارهای پاسخ‌گو و قابلیت بازآرایی سیستم ارائه داد. برای مدل‌سازی همزمان شاخص‌های اقتصادی، بهره‌برداری و امنیت شبکه، آن یک

در شکل (۴-ب) منحنی روزانه توان راکتیو DGها و SCBها رسم شده است. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که درصد بالایی از توان راکتیو مصرفی شبکه توسط SCBها تأمین می‌شود، به طوری که آن‌ها در همه ساعات شبیه‌سازی به منظور بهبود شاخص‌های بهره‌برداری و امنیت ولتاژ، توان راکتیوی برابر با ۱/۳ پریونیت به SDN تزریق می‌کنند. DGها نیز توان راکتیو بین ۰/۳ تا ۰/۵ پریونیت به شبکه ۶۹ باسه تزریق می‌کنند. نکته دیگر، WSها و PVها در زمان‌های که بر اساس شکل (۳-الف) توان اکتیو بالایی را تولید می‌کنند، توان راکتیو تزریقی خود به شبکه را کاهش می‌دهند تا اینکه قید (۱۲) رعایت شود.

## ج. ارزیابی شاخص‌های فنی SDN در این بخش به منظور بررسی

اثر عملکرد منابع اکتیو و راکتیو به علاوه طرح‌های پاسخ‌گوی بار و بازآرایی شبکه بر روی شاخص‌های اقتصادی، بهره‌برداری و امنیت SDN، موارد مطالعاتی زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

- مورد I: آنالیز پخش بار
- مورد II: طرح پیشنهادی با در نظر گرفتن تنها DRP
- مورد III: طرح پیشنهادی با در نظر گرفتن تنها بازآرایی شبکه
- مورد IV: طرح پیشنهادی با در نظر گرفتن تنها SBC
- مورد V: طرح پیشنهادی با در نظر گرفتن تنها DGها
- مورد VI: طرح پیشنهادی

نتایج این بخش در جدول (۶) ارائه شده است. بر اساس این جدول مشاهده می‌شود که مورد I که تنها مطالعات پخش بار شبکه توزیع ۶۹ باسه را مد نظر قرار داده، دارای بیشترین هزینه، VSI و VDF است، اما در موارد دیگر وضعیت توابع مذکور نسبت به مورد I بهتر است، به طوری که بهترین وضعیت توابع مذکور در مورد VI به دست آمده است که متناسب با مسئله (۱) تا (۲۳) است. بنابراین با استفاده از DGها، SCBها، DRP و استراتژی بازآرایی شبکه می‌توان وضعیت مطلوبی از نظر اقتصادی، بهره‌برداری و امنیت SDN به دست آورد. البته توجه شود که در این جدول اثر تک‌تک منابع اشاره شده و استراتژی بازآرایی شبکه بر روی شاخص‌های یادشده بررسی شده است، به طوری که DGها (مورد V) بیشترین اثر را بر روی بهبود وضعیت تمام شاخص‌های مذکور دارند. بازآرایی شبکه (مورد III) اثر قابل توجهی در بهبود وضعیت تلفات انرژی شبکه دارد، زیرا استراتژی مذکور با کلیدزنی کلیدهای سوارشده بر روی خطوط توزیع سعی دارد که مسیری را بین بارها و شبکه بالادست ایجاد کند که تلفات توان کمتری در شبکه ایجاد شود. SCB (مورد IV) موجب بهبود وضعیت VSI و VDF می‌شود و DRP (مورد II) می‌تواند در بهبود وضعیت تمام شاخص‌های یادشده مؤثر باشد.

توان اکتیو و راکتیو پست توزیع (p.u)	$P^S, Q^S$	مسئله سه هدفه بیان کرد که توابع هدف آن به ترتیب کمینه سازی هزینه برنامه ریزی DGها و SCBها و بهره برداری SDN و DGها، کمینه سازی VDF و پیشینه سازی VSI را بر عهده دارند. مسئله مذکور مقید به معادلات پخش توان بهینه و بازآرایی SDN، مدل برنامه ریزی و بهره برداری منابع اکتیو و راکتیو، فرمول بندی DRP و محدودیت های امنیت شبکه است. در گام بعدی، تکنیک بهینه سازی پارتو مبنی بر روش مجموع توابع وزن دار مسئله چندهدفه پیشنهادی را به یک مسئله تک هدفه تبدیل کرد. سپس الگوریتم KHO+CSA برای دستیابی به راه حل بهینه استفاده شد. در نهایت با بررسی نتایج عددی به دست آمده می توان بیان کرد که حل کننده KHO+CSA قادر به دستیابی راه حل بهینه مطمئن در کمترین تکرار همگرایی و زمان محاسباتی است، به طوری که انحراف معیار آن در حدود ۰/۹۴٪ است. به عبارتی آن نیز دارای شرایط تقریبی پاسخ دهی یکتاست. علاوه بر این، طرح پیشنهادی با برنامه ریزی و بهره برداری بهینه منابع اکتیو و راکتیو در شبکه ای دارای بارهای پاسخ گو و قابلیت بازآرایی سیستم قادر است که همزمان شاخص های اقتصادی، بهره برداری و امنیت ولتاژ SDN را به ترتیب در حدود ۲۰، ۴۶ و ۱۱/۵٪ نسبت به مطالعات پخش بار شبکه مذکور بهبود یا ارتقا دهد.
ظرفیت DG (p.u)	$S^{DG}$	پیش بینی می شود طرح پیشنهادی به علت استفاده از منابع و بارهای اکتیو محلی (مستقر در نقاط مصرف) و مدیریت بهینه آنها قادر باشد که در شرایط بحرانی مانند وقوع پیشامد $N - 1$ بتواند خاموشی مصرف کنندگان را کمینه کند و یک شبکه با قابلیت اطمینان بالا را به دست آورد. علاوه بر این، پارامترهایی از قبیل بار، قیمت انرژی و توان تجدیدپذیر در طرح پیشنهادی دارای عدم قطعیت هستند، که مدل سازی تصادفی <sup>۱</sup> و یا مقاوم <sup>۲</sup> آنها می تواند موجب استخراج یک راه حل بهینه مطمئن باشد. اجرای این موارد به عنوان کارهای آینده پیشنهادی می شود.
متغیر باینری وضعیت عملکرد کلید (۱/۰ به معنای عملکرد باز/بسته)	$sw$	
دامنه (p.u) و زاویه (رادیان) ولتاژ	$V, \varphi$	
تابع انحرافات ولتاژ (p.u)	$VDF$	
شاخص امنیت ولتاژ	$VSI$	
حداکثر تعداد پله عملکرد SCB	$x^{SC}$	
متغیر عدد صحیح مربوط به پله عملکرد SCB	$y$	
بدترین شاخص امنیت	$WSI$	
	<b>پارامترها:</b>	
ماتریس تلاقی خط توزیع و باس	$A$	
رسانایی و سوسپتانس خط توزیع (p.u)	$G^L, B^L$	
هزینه سالیانه نصب DG (\$/MVA/year) و SCB (\$/step/year)	$IC^{DG}, IC^{SC}$	
تعداد پله SCB، تعداد باس ها	$N_s, N_B$	
حداکثر تعداد عملکرد (باز یا بسته) کلید	$\bar{N}_{switching}$	
بار اکتیو و راکتیو (p.u)	$P^D, Q^D$	
حداکثر توان تولیدی RDG (p.u)	$\bar{P}^{DG}$	
توان راکتیو هر پله عملکرد SCB (p.u)	$Q^0$	
مقاومت و راکتانس خط توزیع (p.u)	$R, X$	
حداکثر ظرفیت DG (p.u)	$\bar{S}^{DG}$	
حداکثر ظرفیت خط و پست توزیع (p.u)	$\bar{S}^L, \bar{S}^S$	
حداقل و حداکثر مقدار مجاز دامنه ولتاژ (p.u)	$\underline{V}, \bar{V}$	
حداقل مقدار مجاز WSI	$WSI$	
ضرایب تابع هزینه سوخت DG به ترتیب برحسب \$/MWh و \$/MWh <sup>2</sup>	$\alpha, \beta, \gamma$	
قیمت انرژی (\$/MWh)	$\lambda$	
ضریب مشارکت مصرف کنندگان در DRP	$\xi$	

**مجموعه ها و اندیس ها**

اندیس باس، باس، نوع DG و ساعت	$n, j, t, h$
ضعیف ترین باس از نظر دامنه ولتاژ، باس ماقبل باس $p$ متصل شده به این باس	$p, p-1$
باس مرجع	$ref$
مجموعه باس، باس، نوع DG و ساعت	$\Theta_N, \Theta_{DB}, \Theta_{ST}$

**علائم**

**متغیرها**

مجموع هزینه سالیانه برنامه ریزی DG و بانک خازنی	$Cost$
سوئیچ شونده (SCB) و هزینه مورد انتظار بهره برداری سالیانه SDN و DG (\$/year)	$P^{DG}, Q^{DG}$
توان اکتیو و راکتیو DG برحسب پرونیته (p.u)	$P^{DR}, Q^{SC}$
توان اکتیو طرح پاسخ گویی بار (DRP) و توان راکتیو SCB (p.u)	$P^L, Q^L$
توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط توزیع (p.u)	

- [۱] پیروزی، ساسان، مدیریت توان اکتیو و راکتیو شبکه توزیع هوشمند به‌همراه جبران‌سازی هارمونیک بارهای غیرخطی با استفاده از خودروهای الکتریکی، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شیراز، ۱۳۹۶.
- [۲] شریعت‌خواه، محمدرضا، حقی‌فام، محمودرضا، افکوسی پاقلمه، محمد، «مکان‌یابی همزمان تولید پراکنده و خازن در شبکه‌های توزیع و تعیین آرایش بهینه آن»، مهندسی و مدیریت انرژی، جلد اول، شماره ۱، صفحه ۱۸۱-۱۸۱، ۱۳۹۰.
- [۳] رئیسی، علیرضا، عابدینی، محمد، «مشارکت خرده‌فروشان در مدیریت تراکم بر اساس پاسخ‌گویی بار نظارت‌شده توسط بهره‌بردار شبکه»، مهندسی و مدیریت انرژی، جلد ۹، شماره ۱، صفحه ۲-۱۳، ۱۳۹۸.
- [۴] کیا، محسن، ستایش‌نظر، مهرداد، سپاسیان، محمدصادق، «برنامه‌ریزی بهینه مدیریت بارهای کنترل‌پذیر و مشارکت واحدهای تولید همزمان برق و حرارت در حضور ذخیره‌ساز الکتریکی»، مهندسی و مدیریت انرژی، جلد ۷، شماره ۲، صفحه ۱-۱۳، ۱۳۹۶.
- [5] Abbasi, A.R., "Investigation of simultaneous effect of demand response and load uncertainty on distribution feeder reconfiguration", IET Generation, Transmission & Distribution, 14 (8), p. 1438-1449, 2020.
- [6] Farshad, M., "Distributed generation planning from the investor's viewpoint considering pool-based electricity markets", Electric Power Systems Research, Vol. 187, pp. 106474, 2020.
- [7] Zhang, S., and et al., "Multi-objective distributed generation planning in distribution network considering correlations among uncertainties", Applied Energy, Vol. 226, pp. 743-755, 2018.
- [8] Xiang, Y., Wang, Y., Su, Y., Sun, W., Huang, Y., Liu, J., "Reliability correlated optimal planning of distribution network with distributed generation", Electric Power Systems Research, Vol. 186, pp. 106391, 2020.
- [9] Abbasi, A. and et al. "A new intelligent method for optimal allocation of d-stacom with uncertainty", Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 29(5), p. 1881-1888, 2015.
- [10] Arulraj, R., Kumarappan, N., "Optimal economic-driven planning of multiple DG and capacitor in distribution network considering different compensation coefficients in feeder's failure rate evaluation", Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 22, pp. 67-77, 2019.
- [11] Sadeghian, O., Oshnoei, A., Kheradmandi, M., Mohammadi-Ivatloo, B., "Optimal placement of multi-period-based switched capacitor in radial distribution systems", Computers & Electrical Engineering, Vol. 82, pp. 106549, 2020.
- [12] Fiorotti, R., Fardin, J., Encarnacao, L. and Donadel, C., "A novel strategy for distribution network reinforcement planning considering the firm capacity of distributed generation units", IEEE Latin America Transactions, Vol. 17, No. 04, pp. 530-539, 2019.
- [13] Ehsan, A. and Yang, Q., "Coordinated investment planning of distributed multi-type stochastic generation and battery storage in active distribution networks", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 10, No. 4, pp. 1813-1822, 2019.
- [14] Alam, A., Pant, V. and Das, B., "Optimal placement of protective devices and switches in a radial distribution system with distributed generation", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 14, No. 21, pp. 4847-4858, 2020.
- [15] Pasha, A.M., Zeineldin, H.H., El-Saadany, E.F. and Alkaabi, S.S., "Optimal allocation of distributed generation for planning master-slave controlled microgrids", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 13, No. 16, pp. 3704-3712, 20 8 2019.
- [16] Faraji, E. and et al., Probabilistic Planning of the Active and Reactive Power Sources Constrained to Securable-Reliable Operation in Reconfigurable Smart Distribution Networks, Electric Power Systems Research (2021) 107457.
- [17] Abbasi, A. R., "Probabilistic load flow based on holomorphic embedding, kernel density estimator and saddle point approximation including correlated uncertainty variables", Electric Power Systems Research, Volume 183, 2020.
- [18] Hamidpour, H., Aghaei, J., Pirouzi, S., Dehghan, S. and Niknam, T., "Flexible, reliable and renewable power system resource expansion planning considering energy storage systems and demand response programs", IET Renewable Power Generation, Vol. PP, No. 11, pp.1-12, 2019.
- [19] Kavousi-Fard, A. and Niknam, T., "Optimal distribution feeder reconfiguration for reliability improvement considering uncertainty", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 29, No. 3, pp. 1344-1354, 2014.
- [20] Jakob, W. and Blume, C., "Pareto optimization or cascaded weighted sum: a comparison of concepts", Algorithms, Vol. 7, pp. 166-185, 2014.
- [21] Akbari, K. and et al. "Optimal placement of distributed generation in radial networks considering reliability and cost indices", Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 30 (2), 2016, p. 1077-1086.
- [22] Rani, R.R. and Ramyachitra, D., "Krill herd optimization algorithm for cancer feature selection and random forest technique for classification", IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), Beijing, pp. 109-113, 2017.
- [23] Kavousi-Fard, A., Khorram-Nia, R., Rostami, M. and Abbasi, A., "An smart stochastic approach to model plug-in hybrid electric vehicles charging effect in the optimal operation of micro-grids", Journal of Intelligent & Fuzzy Systems 28 (2), 835-842, 2015.
- [24] Babu, P.R., Rakesh, C.P., Srikanth, G., Kumar, M.N. and Reddy, D.P., "A novel approach for solving distribution networks", 2009 Annual IEEE India Conference (INDICON), pp. 1-5, 2009.
- [25] Abbasi, A.R. and Mahmoudi, M.R., "Application of statistical control charts to discriminate transformer winding defects", Electric Power Systems Research, Volume 191, 2021.
- [26] Duong, M.Q., and et. al., "Determination of optimal location and sizing of solar photovoltaic distribution generation units in radial distribution systems", Energies, Vol. 12, pp. 1-25, 2019.
- [27] Maleki, A. and Askarzadeh, A., "Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 7, pp. 147-153, 2014.
- [28] Rahmani, K., Kavousifard, F. and Abbasi, A., "Consideration effect of wind farms on the network reconfiguration in the distribution systems in an uncertain environment", Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, 29:5, 995-1009, 2017.
- [29] Varadarajan, M. and Swarup, K.S., "Differential evolutionary algorithm for optimal reactive power dispatch", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 30, pp. 435-441, 2008.