# یک الگوریتم ابتکاری برای تجدید آرایش شبکه‌های توزیع به منظور کاهش تلفات اهمی مبتنی بر نظریه‌ی گراف

حجت مویدی راد[۱] حمید فلقی[۲] محسن فرشاد[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه قدرت- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
hojatrad@birjand.ac.ir
۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه قدرت- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
falaghi@birjand.ac.ir
۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه قدرت- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
mfarshad@birjand.ac.ir

**چکیده: یکی از راهکارهای کاهش تلفات در شبکه‌های توزیع استفاده از تجدید آرایش فیدرهای فشار متوسط متناسب با سطوح بار مختلف سیستم است. تعداد آرایش‌های ممکن یک شبکه‌ی توزیع بسیار زیاد است و امکان بررسی تمام آرایش‌ها (مخصوصاً در شبکه‌های با مقیاس بزرگ) برای یافتن آرایش بهینه به راحتی میسر نیست. در این مقاله یک الگوریتم جدید مبتنی بر نظریه‌ی گراف و الگوریتم‌های توسعه یافته‌ی آن برای تجدید آرایش شبکه‌های توزیع ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی ابتدا همه‌ی کلیدها بسته فرض می‌شوند و سیستم توزیع به صورت یک ابرگراف مدل می‌شود. وزن‌هایی متناسب با تلفات به هر یک از شاخه‌های این گراف نسبت داده می‌شود. با توجه به ماهیت عملیات تجدید آرایش، مهم‌ترین فاکتور در شبکه‌های توزیع رسیدن به آرایش بهینه‌ی مطلوب در کوتاه‌ترین زمان ممکن است. الگوریتم‌های توسعه یافته‌ی گراف از سرعت بسیار مناسبی برخوردار می‌باشند و با توجه به اینکه تعداد محاسبات پخش بار در الگوریتم پیشنهادی، نسبت به روش‌های دیگر کم می‌باشد، لذا الگوریتم پیشنهادی این مقاله، در مقایسه با روش‌های دیگر از سرعت بسیار مناسبی در رسیدن به بهینه‌ی مطلوب برخوردار می‌باشد. الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه‌های توزیع نمونه اجرا شده است. نتایج به دست آمده کارایی و برتری الگوریتم پیشنهادی را در مقایسه با روش‌های دیگر نشان می‌دهد.**

**کلمات کلیدی: الگوریتم دایجکسترای اصلاح شده، الگوریتم کروسکال حافظه‌دار، تئوری گراف، تجدید آرایش، کاهش تلفات.**

---

**تاریخ ارسال مقاله** : ۱۳۹۰/۰۵/۱۴

**تاریخ پذیرش مقاله** : ۱۳۹۲/۰۸/۰۵

**نام نویسنده‌ی مسئول** : حجت مویدی راد

**نشانی نویسنده‌ی مسئول** : ایران – بیرجند – انتهای بلوار دانشگاه، دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه قدرت.

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

## ۱- مقدمه

تجدید آرایش شبکه‌ی توزیع یکی از عملیات‌های مهم بهینه‌سازی در اتوماسیون این شبکه می‌باشد [1]. با رشد فزاینده‌ی شبکه‌های توزیع موجود، بازآرایی این شبکه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌شود [2] و [3]. در شبکه‌های توزیع به دلیل پایین بودن ولتاژ و در نتیجه بالا بودن جریان، تلفات قابل توجهی خواهیم داشت. همچنین به علت ماهیت متغیر بار، تلفات نیز متغیر خواهد بود. در هر شبکه‌ی توزیع تعدادی کلید وجود دارد که برخی از آنها در حالت عادی باز و برخی دیگر در حالت عادی بسته می‌باشند. با بستن بعضی از این کلیدهای باز و باز کردن همان تعداد از کلیدهای بسته، می‌توان مسیر شارش توان‌ها در شبکه‌های توزیع را به گونه‌ای تغییر داد که تلفات سیستم کاهش یابد [4]. به این فرآیند بازآرایی یا تجدید آرایش شبکه گفته می‌شود.

در تجدید آرایش شبکه‌های توزیع قیودی نیز مطرح است که باید رعایت شوند از جمله: ۱) شبکه ساختار شعاعی داشته باشد، ۲) همه‌ی بارها تغذیه شوند، ۳) محدودیت ولتاژ در هر باس و محدودیت جریان در تمام سکشن‌ها رعایت شود.

هنگامی که در شبکه‌ی توزیع خطای دائمی رخ دهد، تجدید آرایش شبکه برای بازیابی سرویس مشترکان و کم کردن نواحی بی‌برق نیز بکار می‌رود [5]. با وجود کلیدهای کنترل از راه دور در اتوماسیون شبکه‌های توزیع، مدیریت آرایش به صورت بلادرنگ بسیار مهم می‌باشد [6]. طبیعت مسائلی که ترکیبی از مسأله‌های غیرخطی و گسسته با تعداد زیادی از متغیرهای پیوسته و صحیح هستند، این اجازه را به ما می‌دهد که برای حل آنها از روش‌های ابتکاری و الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند استفاده کنیم [7]. تاکنون روش‌های متعددی برای حل مسأله‌ی تجدید آرایش شبکه‌های توزیع ارائه شده است. با توجه به تحقیقات انجام شده در رابطه با این موضوع، به طور کلی روش‌های تجدید آرایش را می‌توان به دو گروه زیر تقسیم کرد:

۱) تجدید آرایش مبتنی بر الگوریتم‌های کلاسیک و ابتکاری با بکارگیری قوانین و الگوریتم‌های ریاضی.
۲) تجدید آرایش مبتنی بر تلفیق هوش مصنوعی و الگوریتم‌های زیستی.

گروه اول، شامل روش‌های کلاسیک همچون جابجایی کلید [4] و کلیدگشایی ترتیبی [8]، یا ترکیبی از این دو روش می‌باشد. گروه دوم، شامل الگوریتم‌هایی مانند: ژنتیک [1] و [9-13]، اجتماع ذرات [10] و [14] و [۱۵]، اجتماع مورچه‌ها [16] و [17]، نظریه‌های فازی [18-20]، شبکه‌های عصبی مصنوعی [21-23]، هوش مصنوعی [24]، سخت‌کاری فلزات [25-28] و همچنین ترکیبی از این الگوریتم‌ها [7]، [11] و [29-33] می‌باشد. در [1] نیز از ترکیب نظریه‌ی گراف و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

اکثر روش‌های استفاه شده در هر دو گروه فوق‌الذکر در رسیدن به جواب بهینه‌ی مطلوب موفق بوده‌اند. با توجه به ماهیت مسأله‌ی تجدید آرایش، سرعت اجرای این الگوریتم‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در گزارش‌های آمده در مجموعه مقالات اخیر، روش‌های مربوط به گروه اول نسبت به گروه دوم از نظر سرعت اجرای الگوریتم، برتری آشکاری دارد. از سوی دیگر در بعضی از روش‌های گزارش شده مانند [4]، [7]، [30] و [33] روش‌های پیشنهادی به ساختار اولیه‌ی شبکه وابسته‌اند، که جزء معایب این روش‌ها محسوب می‌شود. روش‌های دیگر مانند [1]، [8-29]،[31] و [32] به ساختار اولیه‌ی شبکه وابسته نیستند.

در این مقاله شبکه‌ی توزیع به صورت یک ابرگراف مدل می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم‌های توسعه یافته‌ی گراف و مفهوم اغتشاش یک درخت فراگیر بهینه تولید می‌شود. الگوریتم‌هایی نظیر الگوریتم کروسکال، همواره درخت بهینه‌ی مطلق تولید می‌کنند. اثبات این موضوع در مرجع [۳۴] آمده است. همچنین لازم به ذکر است که در الگوریتم پیشنهادی، آرایش بهینه فقط با اجرای تعداد محدودی پخش بار بدست می‌آید. لذا روش پیشنهادی در زمان کوتاهتری در مقایسه با سایر روش‌های موجود، آرایش بهینه را پیدا می‌کند. به طوری که برای کاربردهای عملی در سیستم‌های با ابعاد بزرگ که زمان انجام محاسبات در آنها بسیار مهم است، مناسب خواهد بود.

ساختار ادامه‌ی مقاله بدین شرح است: پایه‌ی ریاضی مسأله، شامل مقدمه‌ای بر نظریه‌ی گراف، الگوریتم کروسکال حافظه‌دار[1]، الگوریتم دایجکسترای اصلاح شده[2] و نیز نحوه‌ی مشخص کردن وزن یال‌های گراف شبکه، در بخش ۲ ارائه شده است. در بخش ۳، روش پیشنهادی برای تجدید آرایش شبکه‌های توزیع معرفی شده است. در بخش ۴، الگوریتم پیشنهادی بر روی یک سیستم نمونه شرح داده شده است. در بخش ۵، الگوریتم پیشنهادی بر روی سه شبکه‌ی توزیع نمونه، ارائه و با نتایج روش‌های دیگر مقایسه شده است. در بخش ۶ نیز نتیجه‌گیری آمده است.

## ۲- نظریه‌ی گراف

### ۲-۱- مقدمه‌ای بر نظریه‌ی گراف

گراف $G$، یک سه تایی مرتب به صورت $(\Psi_G, V(G), E(G))$ می‌باشد. $V(G)$ یک مجموعه‌ی ناتهی از رأس‌ها است. $E(G)$ یک مجموعه‌ای از یال‌ها است که مجموعه‌ی مجزای از $V(G)$ را تشکیل می‌دهد. $\Psi_G$ یک تابع وقوع است که به هر یال $G$، یک زوج نامرتب از رأس‌های گراف را که الزاماً متمایز نیستند، نسبت می‌دهد. اگر $e$ یک



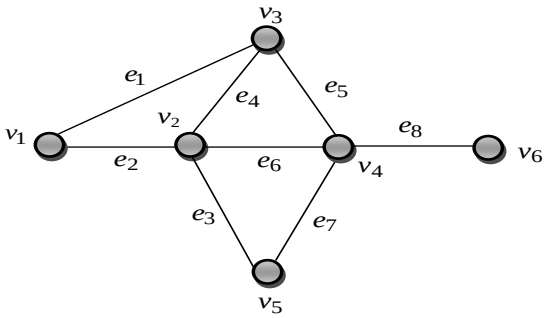
[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

یال، $u$ و $v$ دو رأس باشند به طوری که $\Psi_G = uv$، در این صورت گفته می‌شود که $e$، رأس‌های $u$ و $v$ را به یکدیگر وصل کرده است. رأس‌های $u$ و $v$، دو سر یال $e$ نامیده می‌شوند. درجه‌ی رأس $v$ ($d(v)$) در گراف $G$، برابر مجموع یال‌های ($E_i$) واقع بر آن رأس می‌باشد. با استفاده از رابطه‌ی (۱) درجه‌ی هر رأس را می‌توان محاسبه نمود [۳۳].

$$d(v) = \sum E_i \qquad (۱)$$

اگر در گرافی بین دو رأس دلخواه حداقل یک مسیر وجود داشته باشد و هیچ حلقه‌ای در آن وجود نداشته باشد به آن گراف همبند گویند. درخت یک گراف بی‌دور همبند است. در درخت، هر دو رأس با یک مسیر یکتا به یکدیگر متصلند. رابطه‌ی (۲) همواره برای یک گراف درختی برقرار است.

$$V = E - 1 \qquad (۲)$$




**شکل (۱): نمایش اجزای یک گراف وزن‌دار ساده.**

که در آن $V$ تعداد رأس‌ها و $E$ تعداد یال‌ها است. گرافی که دارای $v$ رأس و $e$ یال باشد را می‌توان توسط ماتریس وابستگی به صورت $M_{v\times e}$ بیان کرد. چنانچه رأس و یالی به هم وصل باشند، مؤلفه‌ی آن برابر یک است و در غیر اینصورت مؤلفه‌ی آن برابر صفر خواهد بود. در شکل (۱) یک گراف وزن‌دار ساده نشان داده شده است.

برای گراف $G = (V, E)$ در شکل (۱) می‌توان نشان داد:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\} \qquad (۳)$$

$$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8\} \qquad (۴)$$

$$\begin{aligned} &e_1 = (v_1, v_3),\ e_2 = (v_1, v_2),\ e_3 = (v_2, v_5),\\ &e_4 = (v_2, v_3),\ e_5 = (v_3, v_4),\ e_6 = (v_2, v_4),\\ &e_7 = (v_4, v_5),\ e_8 = (v_4, v_6) \end{aligned} \qquad (۵)$$

تعداد حلقه‌های اساسی در یک گراف، از رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود:

$$Cycle = (E + 1) - V \qquad (۶)$$

اگر در گرافی وزن‌دار، مقدار وزن یالی برابر مقداری ناچیز یا صفر قرار گیرد، در اصطلاح گفته می‌شود که آن یال منقبض شده است یا به عبارتی رأس‌های مجاور آن یال بر هم منطبق شده‌اند. همچنین اگر وزن یالی برابر مقدار بسیار بزرگی (بینهایت) قرار گیرد، در اصطلاح گفته می‌شود که آن یال منبسط شده است.

## ۲-۲- الگوریتم کروسکال حافظه‌دار

گراف بی‌دور را اصطلاحاً جنگل می‌نامند و هر مؤلفه از جنگل، یک درخت است. درخت فراگیر با کمترین وزن در یک گراف وزن‌دار، درخت بهینه نامیده می‌شود. در تجدید آرایش شبکه‌های توزیع، هدف یافتن یک درخت فراگیر بهینه می‌باشد. الگوریتم کروسکال یک روش خوب برای یافتن درخت بهینه در یک گراف همبند وزن‌دار است. فلوچارت الگوریتم کروسکال در شکل (۲) نشان داده شده است [۳۴]. در این فلوچارت، $s$ مجموعه‌ای از یال‌ها است که در طی اجرای الگوریتم کروسکال انتخاب می‌شوند. $i$ برابر تعداد یال‌های انتخاب شده، $j$ برابر شماره‌ی یال‌های انتخاب شده، $v$ تعداد رأس‌ها، $a$ها برچسب اولیه‌ی یال‌های گراف $G$، $e$ها برچسب یال‌های انتخاب شده از گراف $G$ و $T^*$ مجموعه‌ی یال‌های انتخاب شده‌ی نهایی می‌باشند. در الگوریتم کروسکال ابتدا یال‌ها، در بلوک (۱) به ترتیب صعودی مرتب می‌شوند. در بلوک (۲) مشخص می‌شود که چند یال انتخاب شده است. هنگامیکه شرط $i = v\text{-}1$ برقرار شود، به این مفهوم است که مجموعه‌ی $S$، شامل یال‌هایی است که تشکیل یک درخت فراگیر داده‌اند. آنگاه مجموعه‌ی $\{e_1, e_2, .., e_{v\text{-}1}\}$، مجموعه‌ی یال‌های یک درخت بهینه $T^*$، از $G$ خواهد بود. در بلوک (۳) برای اینکه مشخص شود آیا $G[s \cup \{a_j\}]$ بی‌دور است، باید بررسی شود که آیا دو سر $a_j$ در مؤلفه‌های متفاوتی از جنگل $G[s]$ قرار دارند یا نه. این عمل به این صورت انجام می‌شود که رأس‌ها را طوری برچسب‌گذاری می‌کنیم که در هر مرحله، دو رأس به مؤلفه‌ی یکسان از $G[s]$ تعلق داشته باشند، اگر و تنها اگر این رأس‌ها برچسب‌های یکسانی داشته باشند. در ابتدا به ازای $1 \le l \le v$ برچسب $l$ را به رأس $v_1$ نسبت می‌دهیم. با این شیوه‌ی برچسب‌گذاری، $G[s \cup \{a_j\}]$ بی‌دور خواهد بود اگر و تنها اگر دو سر $a_j$ برچسب‌های متفاوتی داشته باشند. اگر به این صورت باشد، $a_j$ به عنوان $e_{i+1}$ برگزیده می‌شود. در غیر این صورت از $e_j$ صرف نظر شده و $e_{j+1}$ به عنوان کاندیدای بعدی برای $e_{i+1}$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. به محض اینکه $e_{i+1}$ به $s$ اضافه شد، رأس‌های دو مؤلفه از $G[s]$ که شامل دو سر $e_{i+1}$ می‌باشند، دوباره با برچسب‌های خودشان برچسب‌گذاری می‌شوند. برای هر یال، با یک مقایسه می‌توان فهمید که برچسب‌های دو سر آن یکسان یا متفاوتند [۳۴].


[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

در این مقاله الگوریتم کروسکال باید جواب مرحله‌ی قبل را در خود ذخیره داشته باشد. یعنی یال خاصی همیشه قطع باشد. برای این منظور وزن یالی که در یک حلقه خاص از گراف مد نظر است برابر یک مقدار بزرگ قرار می‌گیرد. با قطع بودن آن، الگوریتم کروسکال درخت فراگیر جدید را تولید کند.

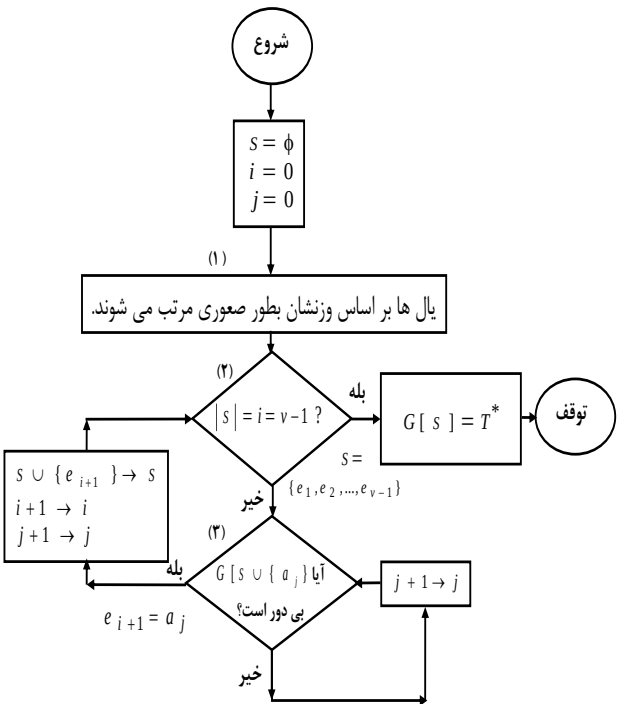
## ۲-۳- الگوریتم دایجکسترای اصلاح شده

الگوریتم دایجکسترا، کوتاهترین مسیر بین دو رأس دلخواه $u$ و $v$ را تعیین می‌کند. این الگوریتم همچنین قابلیت تعیین کوتاه‌ترین مسیر بین یک رأس تا تمام رأس‌های دیگر را نیز دارد.

برای بیان جزئیات این الگوریتم فرض می‌کنیم: $V$ مجموعه‌ی تمام رأس‌های گراف $G$، $S$ زیرمجموعه‌ای از مجموعه‌ی $V$، $\bar{S}$ زیر مجموعه‌ای از $S$، $P$ به عنوان نمایش مسیر بین رأس‌ها، $(u,v)$ نمایانگر مسیر بین رأس $u$ تا رأس $v$، $d(u,v)$ فاصله‌ی بین $u$ تا $v$، $l(v)$ برچسب رأس $v$، $w(uv)$ به عنوان وزن یال بین دو رأس $u$ و $v$، $u_0$ را به عنوان رأس آغازین و همچنین $\bar{u}$ و $\bar{v}$ را به عنوان رأس‌های متعلق به $\bar{S}$ در نظر می‌گیریم.

اگر $P = u_0 \ldots \bar{u}\ \bar{v}$ یکی از کوتاهترین مسیرهای بین $u_0$ تا $\bar{v}$ باشد، آنگاه واضح است که $\bar{u} \in S$ و $(u_0, \bar{u})$ از $P$ باید کوتاه‌ترین مسیر باشد. در نتیجه،

$$d(u_0, \bar{v}) = d(u_0, \bar{u}) + w(\bar{u}\bar{v}) \qquad (۷)$$




**شکل (۲): فلوچارت الگوریتم کروسکال [۳۴].**

فاصله $u_0$ تا $\bar{S}$ توسط رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود.

$$d(u_0, \bar{S}) = \min\ \{d(u_0, u) + w(uv)\} \quad \forall u \in S_0, v \in \overline{S_0} \qquad (۸)$$

مرحله‌ی نخست، تعیین نزدیک‌ترین رأس به $u_0$ می‌باشد. این عمل با محاسبه‌ی $d(u_0, \overline{S_0})$ و انتخاب رأسی مانند $u_1 \in \overline{S_0}$ انجام می‌شود، به طوری که $d(u_0, u_1) = d(u_0, \overline{S_0})$.

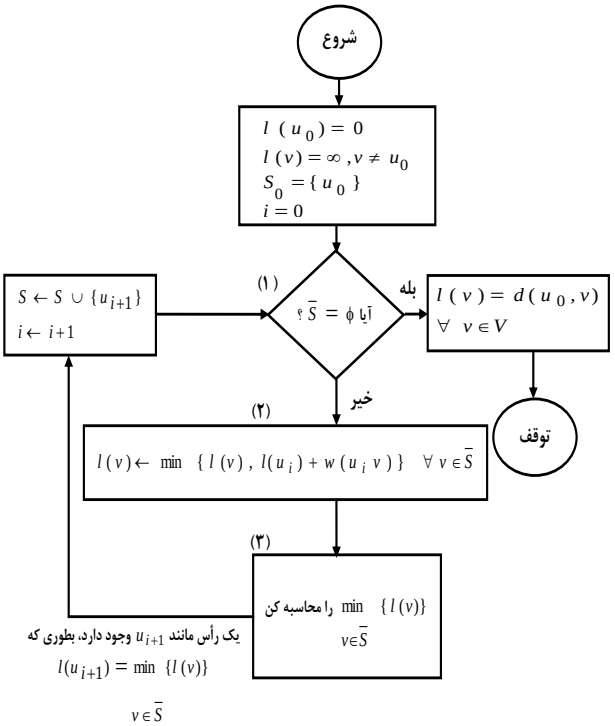
با توجه به رابطه‌ی (۸)، رابطه‌ی (۹) را داریم.

$$d(u_0, \bar{S}) = \min\{d(u_0, u) + w(uv)\} = \min\{w(u_0 v)\} \quad \forall u \in S_0, v \in \overline{S_0} \qquad (۹)$$

بنابراین $d(u_0, \overline{S_0})$ به راحتی محاسبه می‌گردد. اکنون قرار می‌دهیم $S_1 = \{u_0, u_1\}$ و فرض می‌کنیم $P_1$ نشان‌دهنده‌ی مسیری مانند $u_0 u_1$ باشد که به وضوح کوتاه‌ترین مسیر است.

بطور خلاصه الگوریتم دایجکسترا را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

گام ۱- قرار بده $i = 0$, $S_0 = \{u_0\}$, $l(u_0) = 0$ و همچنین برای هر $u \neq u_0$ قرار بده $l(v) = \infty$.




**شکل (۳): فلوچارت الگوریتم دایجکسترا [۳۴].**

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

گام ۲- در مرحله‌ی بعدی برای هر $v \in \overline{S_i}$ , $l(v)$ را با عبارت $\min\{l(v), l(u_i) + w(u_i v)\}$ جایگزین کن و $\min\{l(v)\}$ را به ازای $v \in \overline{S_i}$ محاسبه کن. اگر $u_{i+1}$ رأسی داشته باشد که این مینیمم را به دست می‌دهد، قرار بده $S_{i+1} = S_i \cup \{l(v)\}$.

گام ۳- اگر $i = v-1$ توقف کن و اگر $i < v-1$، $i$ را با $i+1$ جایگزین کرده به مرحله ۲ برو.

هنگامی که الگوریتم به پایان برسد، فاصله‌ی $u_0$ تا $v$ به وسیله‌ی مقدار نهایی برچسب $v_0$ مشخص می‌گردد. با توجه به اینکه در اینجا هدف تعیین فاصله‌ی $u_0$ تا رأس خاصی است، به محض اینکه $u_i$ برابر رأس مورد نظر شد، الگوریتم متوقف خواهد شد. نمودار گردشی این الگوریتم در شکل (۳) آمده است.

این الگوریتم نمونه‌ای از یک الگوریتم خوب می‌باشد. محاسبات انجام شده در کادرهای (۲) و (۳) از نمودار گردشی، روی هم رفته، به $v(v\text{-}1)/2$ عمل جمع و $v(v\text{-}1)$ عمل مقایسه نیازمند است [۳۴].

در این مقاله از الگوریتم دایجکسترا برای یافتن یک دور کمینه از نظر تلفات، مورد استفاده قرار گرفته است. برای یافتن دور کمینه‌ی مطلق در یک گراف همبند وزن‌دار، ابتدا یال‌های آن را برچسب‌گذاری می‌کنیم و درجه‌ی رأس‌ها را طبق رابطه‌ی (۱) تعیین می‌کنیم. به طور مجازی یال بین دو رأس مجاور با درجه‌ی رأس بیشتر در آن گراف را منبسط با یک مقدار خیلی بزرگ، فرض می‌کنیم. توسط الگوریتم دایجکسترا، کوتاه‌ترین فاصله‌ی بین این دو رأس مجاور را می‌یابیم. آنگاه با در نظر گرفتن یال منبسط شده و مسیر مشخص شده توسط الگوریتم دایجکسترا، یک دور کمینه، بین رأس‌های انتخابی در گراف مورد نظر حاصل شده است. برچسب و وزن این دور را در لیستی موسوم به لیست دورها ذخیره می‌کنیم. در ضمن وزن درخت‌هایی که متصل به رأس‌های دور تعیین شده قرار گرفته‌اند را به مجموع وزن کل دور اضافه می‌کنیم.

در ادامه، همین عمل را برای دو رأس مجاور متمایز از دو رأس قبلی با بیشترین درجه‌ی رأس انجام می‌دهیم و دور کمینه که برچسب آن متفاوت از دور قبلی است را به همراه وزن مربوط به آن، در لیست دورها ذخیره می‌کنیم. این روند به تعداد دورهای متمایز موجود در یک گراف تکرار می‌شود.

تعداد دورهای متمایز موجود در یک گراف را می‌توان از رابطه‌ی (۶) محاسبه کرد. دوری که کم‌ترین وزن را در لیست دورها دارد، به عنوان یک دور کمینه‌ی مطلق در گراف مذبور انتخاب می‌شود. از این الگوریتم ابتکاری پیشنهاد شده توسط این مقاله، برای یافتن یک دور کمینه در گراف وزن‌دار مدل شده از شبکه‌ی توزیع، استفاده می‌شود. در این مقاله با استفاده از الگوریتم دایجکسترا، یک الگوریتم ابتکاری برای یافتن یک دور کمینه در یک گراف همبند پیشنهاد شده، که از آن به عنوان الگوریتم دایجکسترای اصلاح شده یاد می‌کنیم.

## ۲-۴- تعیین وزن‌ها در گراف

در بیشتر مقالات از جمله [34]، تلفات خطوط توزیع به صورت رابطه‌ی (۱۰) مدل شده است.

$$P_L = \sum_{i=1}^{n} R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \qquad (۱۰)$$

رابطه‌ی (۱۰) تلفات اهمی خطوط را نشان می‌دهد که در آن $R_i$ مقاومت اهمی سکشن $i$ام، $n$ تعداد سکشن‌ها، $P_i$ و $Q_i$ به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو جاری در سکشن $i$ام و $V_i$ ولتاژ انتهایی سکشن $i$ام می‌باشند. در شبکه‌ی توزیع ممکن است خطوطی با توان عبوری پایین وجود داشته باشند، که به علت عبور همین توان پایین تلفاتشان نسبت به خطوط با توان عبوری بالا کمتر باشد و هم‌چنین ممکن است خط کارآمدی به دلیل توان عبوری بالا، تلفات بالایی نسبت به خطوط دیگر داشته باشد. پس منطقی است که توان عبوری از خطوط در رابطه‌ی تعیین وزن‌های گراف مد نظر قرار گیرد. بنابراین جمله‌ی نرمالیزه شده‌ی تلفات بهتر از جمله‌ی مطلق تلفات خواهد بود. لذا از رابطه‌ی (۱۱) که بیانگر تلفات نسبی خط است، برای تعریف وزن‌های گراف استفاده شده است.

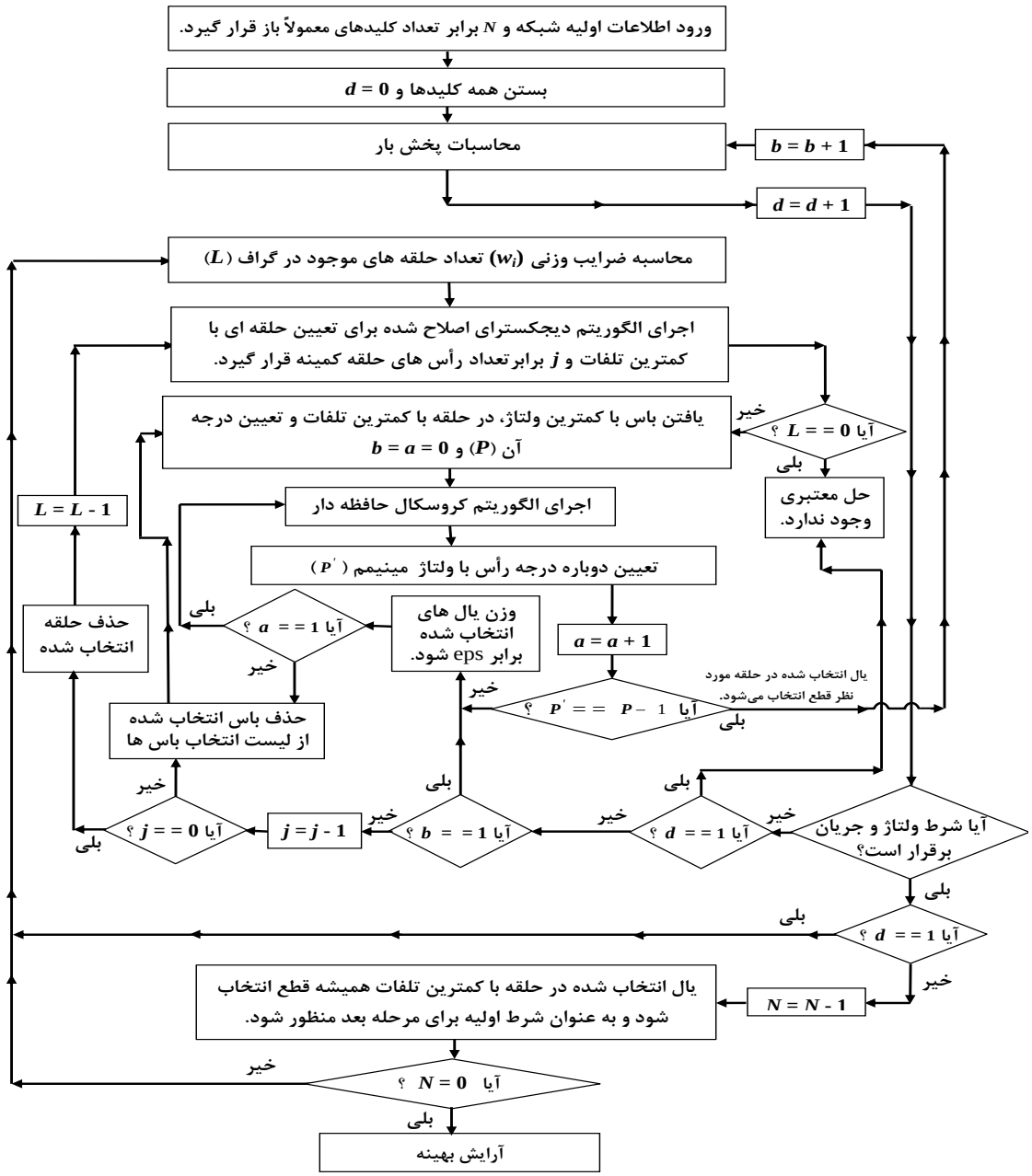
$$w_i = \frac{S_i}{R_i \cdot I_i^2} \qquad (۱۱)$$

که در آن $w_i$ ضریب وزنی منتسب به سکشن $i$ام، $S_i$ و $I_i$ به ترتیب توان ظاهری و دامنه‌ی جریان عبوری از سکشن $i$ام می‌باشند.

# ۳- روش پیشنهادی برای تجدید آرایش

فلوچارت روش تجدید آرایش پیشنهادی مبتنی بر نظریه‌ی گراف در شکل (۴) نشان داده شده است. در ابتدا تمام کلیدها بسته فرض می‌شوند. لذا آرایش بهینه به ساختار اولیه‌ی شبکه بستگی نخواهد داشت. با بسته شدن کلیدها شبکه از حالت شعاعی به غربالی تبدیل می‌شود. سپس با انجام محاسبات پخش بار [36] پارامترهای رابطه‌ی (۱۱) به دست می‌آیند. از طریق این رابطه، وزن تمامی یال‌های گراف مشخص می‌شوند. در حالت آرایش غربالی به علت تقسیم بار کمترین میزان تلفات ممکن را خواهیم داشت. با دانستن این نکته، باید خطوطی که کمترین اغتشاش را به سیستم وارد می‌کنند، قطع شوند. لذا اولین کلیدی که باید قطع شود از حلقه‌ای با کمترین تلفات انتخاب خواهد شد که کمترین اغتشاش را از نظر تغییرات تلفات به سیستم وارد کند.

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]




**شکل (۴): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای تجدید آرایش شبکه‌های توزیع.**

یک ابرگراف به صورت‌های متفاوتی می‌تواند بر روی صفحه پیاده‌سازی شود و حلقه‌های متفاوتی خواهد داشت. الگوریتم دایجکسترای اصلاح شده، یک حلقه‌ی کمینه از نظر تلفات را، در بین حلقه‌های موجود جستجو می‌کند. حال کلیدی که در این حلقه باز خواهد شد، باید از نقطه‌ای باشد که کمترین اغتشاش را از نظر ولتاژی به حلقه وارد کند و این نقطه در واقع گره‌ای است که کمترین ولتاژ را در آن حلقه دارد. برای اینکه خط قطع شده به نقطه‌ی با کمترین ولتاژ وصل باشد، درجه‌ی آن طبق رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود. در ادامه، الگوریتم کروسکال اجرا می‌شود. بعد از اجرای این الگوریتم دوباره درجه‌ی رأس با کمترین ولتاژ محاسبه می‌شود و اگر از درجه‌ی آن یک واحد کم شود، به این معناست که شاخه‌ی قطع شده از این نقطه بوده است. در غیر این صورت وزن‌های انتخاب شده برابر مقدار ناچیز eps قرار می‌گیرند تا از فضای جستجوی الگوریتم کروسکال خارج شوند. این روند تا وقتی که از درجه‌ی رأس با ولتاژ کمتر یکی کم شود ادامه می‌یابد. به یک رأس ممکن است چندین یال وصل باشد. یالی از حلقه‌ی با کمترین تلفات می‌تواند قطع شود که: ۱) آن یال به رأس با ولتاژ کمتر متصل باشد، ۲) تمامی بارها تغذیه شوند (به عبارت دیگر گراف همبند باشد) و ۳) آن یال بیشترین وزن را نیز داشته باشد. این یال توسط الگوریتم کروسکال حافظه‌دار تعیین می‌شود.



[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

با قطع بودن یالی که در مرحله‌ی اول توسط الگوریتم کروسکال انتخاب شده، محاسبات پخش بار انجام می‌شود و با برقراری محدودیت‌ها، این یال برای همیشه قطع می‌ماند و در حافظه‌ی الگوریتم کروسکال ذخیره می‌شود. به این ترتیب اولین کلید که همان یال قطع شده است، انتخاب می‌شود. سپس با اطلاعات جدید حاصل از محاسبات پخش بار با قطع بودن یال انتخاب شده، وزن یال‌ها به روز می‌شوند و مراحل بالا تا انتخاب نهایی کلیدهای دیگر ادامه می‌یابد. این الگوریتم به تعداد کلیدهای همیشه باز تکرار می‌شود و شبکه‌ی نهایی قطعاً شعاعی خواهد بود، زیرا یال‌های قطع شده توسط الگوریتم کروسکال که ماهیت درختی دارد، قطع شده‌اند.

پارامترهای بکار رفته در الگوریتم پیشنهادی عبارتند از: $L$ تعداد حلقه‌های اساسی موجود در گراف، $P$ درجه‌ی رأس انتخاب شده، $P'$ درجه‌ی رأس انتخاب شده بعد از اجرای الگوریتم کروسکال، $d$ برای مشخص کردن حالت غربالی، $N$ تعداد کلیدهای معمولاً باز، $b$ به عنوان بررسی یال‌های متناظر با رأس انتخاب شده، $j$ تعداد رأس‌های موجود در حلقه‌های انتخاب شده، $a$ برای تعیین حالتی که الگوریتم کروسکال نتواند یالی را از رأس انتخاب شده قطع کند (برای حذف رأس انتخاب شده).

مراحل اجرای الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر است:

گام ۱- در ابتدا، اطلاعات سیستم مورد مطالعه وارد می‌شوند. $N$ برابر تعداد کلیدهای معمولاً باز در آرایش اولیه قرار می‌گیرد.

گام ۲- همه‌ی کلیدها بسته می‌شوند و شمارنده‌ی $d$ برای تعیین حالت غربالی برابر صفر قرار می‌گیرد.

گام ۳- محاسبات پخش بار بر روی شبکه‌ی غربالی اجرا می‌شود. اگر محدودیت‌ها ولتاژ و جریان در حالت غربالی رعایت نشده باشند، با بازآرایی شبکه‌ی توزیع نمی‌توان این محدودیت‌ها را برآورده کرد. لذا حل مناسبی یافت نخواهد شد. در این گام به شمارنده‌ی $d$ یک واحد اضافه می‌شود تا در صورت ادامه‌ی الگوریتم، حالت غربالی تشخیص داده شود.

گام ۴- ضرایب وزنی یال‌ها ($w_i$) طبق رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌شوند. تعداد حلقه‌های موجود در یک گراف نیز از رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود و $L$ برابر تعداد حلقه‌ها قرار می‌گیرد.

گام ۵- الگوریتم دایجکسترای اصلاح شده با جستجو در گراف، یک حلقه با کمترین تلفات را می‌یابد. شمارنده‌ی $j$ را برابر تعداد رأس‌های موجود در آن حلقه قرار می‌دهد.

گام ۶- در حلقه‌ی تعیین شده توسط دایجکسترای اصلاح شده، باس با کمترین ولتاژ جستجو می‌شود و درجه‌ی رأس آن طبق رابطه‌ی (۱) برابر $P$ قرار می‌گیرد. در این گام، شمارنده $b$ و $a$ برابر صفر قرار می‌گیرند. شمارنده‌ی $b$ برای بررسی یال‌های مجاور رأس با ولتاژ پایین‌تر در حلقه‌ی کمینه، تعریف شده است. شمارنده‌ی $a$ به این دلیل تعریف شده است که اگر هیچ یک از یال‌های متصل به باس با ولتاژ پایین، به علت نقض قیدهای آرایشی، نامزد قطع شدن نباشند، آنگاه باس انتخاب شده از لیست باس‌ها حذف شود و باس بعدی با کمترین ولتاژ انتخاب شود.

گام ۷- الگوریتم کروسکال حافظه‌دار بر روی کل شبکه اجرا می‌شود و با در نظر گرفتن شرایط کل شبکه و شرط‌های تعریف شده برای آن، یال با بیشترین وزن را در حلقه‌ی مورد نظر می‌یابد. دوباره درجه‌ی رأس با کمترین ولتاژ طبق رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود. اگر از درجه‌ی رأس آن، یکی کم شده باشد، شاخه‌ی قطع شده از این نقطه بوده است.

گام ۸- محاسبات پخش بار با قطع بودن یال انتخابی در حلقه‌ی با کمترین تلفات، بر روی کل شبکه اجرا می‌شود. اگر محدودیت ولتاژ و جریان رعایت نشده باشد، الگوریتم کروسکال با در نظر گرفتن شرط‌های تعریف شده برای آن، بررسی می‌کند آیا شاخه‌ی باقیمانده‌ی متصل به گره با کمترین ولتاژ می‌تواند قطع شود یا نه. در صورت منفی بودن جواب، در همان حلقه‌ی کمینه از نظر تلفات، باس دیگری با ولتاژ پایین، انتخاب می‌شود و یال‌های متصل به آن بررسی می‌شوند. در هر صورت در حلقه‌ی کمینه، تمامی باس‌ها بررسی می‌شوند تا محدودیت‌های جریانی و ولتاژی برآورده شوند. اگر باز هم این محدودیت‌ها رعایت نشده باشند، حلقه‌ی بعدی از نظر تلفات کمینه، انتخاب می‌شود و مراحل بررسی، دوباره ادامه می‌یابد. این روند تا بررسی تمامی حلقه‌ها ادامه می‌یابد تا $L$ برابر صفر شود. صفر شدن $L$ به این مفهوم است که تمامی شاخه‌هایی که امکان قطع شدنشان وجود داشته است بررسی شده‌اند. اگر در پایان هیچ شاخه‌ای انتخاب نشد، حلی برای تجدید آرایش وجود ندارد (یعنی با عملیات تجدید آرایش نمی‌توان این قیدها را برآورده کرد).

گام ۹- در صورت برقراری محدودیت‌های ولتاژ و جریان، شاخه‌ای که در این مرحله انتخاب شده است به عنوان شرط اولیه‌ی مرحله‌ی بعد، در حافظه‌ی الگوریتم کروسکال حافظه‌دار ذخیره می‌شود. سپس با اطلاعات جدید حاصل از محاسبات پخش بار با قطع بودن یال انتخاب شده، وزن‌ها به‌روز می‌شوند و مراحل قبلی دوباره تکرار می‌شود.

در هر مرحله یک کلید انتخاب می‌شود. الگوریتم پیشنهادی برای تجدید آرایش به تعداد کلیدهای معمولاً باز تکرار می‌شود. در نهایت کلیدهایی که در حافظه‌ی الگوریتم کروسکال حافظه‌دار ذخیره شده‌اند، کلیدهای نهایی برای باز شدن هستند.

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

## ٤- مراحل اجرا در یک شبکه‌ی نمونه

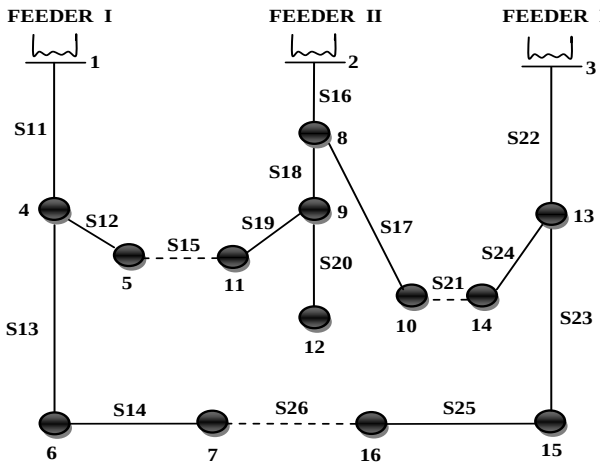
دیاگرام تک خطی یک شبکه‌ی توزیع سه فیدر در شکل (۵) نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به بار و ساختار این شبکه در مرجع [4] بیان شده است. این شبکه که مبنای کار بسیاری از مطالعات تجدید آرایش بوده است، علی‌رغم اندازه‌ی کوچک، تمام خصوصیات یک شبکه‌ی واقعی را دارا می‌باشد. در این شبکه تعداد حالت کلیدزنی برابر ۱۶۲ می‌باشد. کلیدهای S26، S21 و S15 در آرایش اولیه معمولاً باز می‌باشند. تلفات اولیه آن ۵۱۱/۶۴ kW و تلفات حالت غربالی آن برابر ۴۲۵/۵۴ kW می‌باشد.

مراحل اجرای الگوریتم پیشنهادی برای تجدید آرایش بر روی این شبکه‌ی ۱۶ باسه، به صورت زیر است:

گام ۱- در ابتدا اطلاعات سیستم مورد مطالعه، وارد می‌شوند. $N$ برابر کلیدهای معمولاً باز در آرایش اولیه قرار می‌گیرد ($N$=۳).

گام ۲- همه‌ی ۱۶ کلید بسته می‌شوند: S11 تا S26 و شمارنده‌ی $d$ که برای تعیین حالت غربالی است برابر صفر قرار می‌گیرد ($d$ =۰).

گام ۳- محاسبات پخش بار بر روی شبکه‌ی غربالی اجرا می‌شود و به شمارنده‌ی $d$ یک واحد اضافه می‌شود ($d$=۱). محدودیت‌های ولتاژ و جریان رعایت شده است.




**شکل (۵): دیاگرم تک‌خطی شبکه‌ی توزیع ۱۶ باسه [4].**

گام ۴- با توجه به یک بودن $d$، ضرایب وزنی یال‌ها ($w_i$) طبق رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌شوند. مقادیر وزن هر یال در جدول (۱) آمده است. تعداد یال‌های گراف موجود برابر $E$ و تعداد رأس‌ها برابر $V$ قرار می‌گیرند (در اجرای اول: $E$ =۱۶ و $V$ =۱۴). با مشخص بودن تعداد یال‌های موجود و رأس‌ها در این گراف، تعداد حلقه‌های اساسی موجود (*Cycle*) طبق رابطه‌ی (۶) برابر است با:

$$Cycle = (16+1) - 14 = 3 \quad \rightarrow \quad L = 3$$

گام ۵- الگوریتم دایجکسترای اصلاح شده با جستجو در گراف، حلقه‌ی شامل کلیدهای S24, S21, S17, S18, S19, S15, S12, S13, S14, S26 S23, و S25 را به عنوان حلقه‌ی کمینه از نظر تلفات مشخص می‌کند. $j$ برابر تعداد رأس‌های موجود در حلقه، یعنی ۱۲ قرار می‌گیرد.

گام ۶- در حلقه‌ی تعیین شده توسط الگوریتم دایجکسترای اصلاح شده، باس با کمترین ولتاژ، مربوط به باس ۹ است و درجه‌ی رأس آن برابر ۳ است ($P$=۳). در این گام مقدار شمارنده‌های $b$ و $a$ برابر صفر قرار می‌گیرند.

گام ۷- الگوریتم کروسکال بر روی کل شبکه اجرا می‌شود و با در نظر گرفتن شرایط کل شبکه و قیدهای ذکر شده در بخش قبلی، یالی که کلید S19 در آن قرار دارد را انتخاب می‌کند.

گام ۸- به شمارنده‌ی $b$ یک واحد اضافه می‌شود ($b$ =۱). محاسبات پخش بار با قطع بودن S19، بر روی کل شبکه اجرا می‌شود و به شمارنده‌ی $d$ یک واحد اضافه می‌شود ($d$=۲). محدودیت‌های ولتاژ و جریان رعایت شده است.

گام ۹- با توجه به برقراری محدودیت‌های ولتاژ و جریان و مخالف یک بودن $d$،کلید S19 به عنوان شرط اولیه‌ی مرحله‌ی بعد در حافظه‌ی الگوریتم کروسکال حافظه‌دار ذخیره می‌شود. از مقدار $N$ یکی کم می‌شود ($N$=۲). در این گام، اجرای اول الگوریتم پیشنهادی به پایان می‌رسد.

**جدول(۱): مقادیر وزن‌ها در اجرای اول الگوریتم پیشنهادی (حالت غربالی) برای شبکه‌ی توزیع ۱۶ باسه.**

| کلید | وزن | کلید | وزن |
|---|---|---|---|
| S26 | ۱/۲۷۳۹ | S13 | ۰/۳۹۱۱ |
| S17 | ۱/۳۸۰۶ | S23 | ۰/۳۱۷۸ |
| S14 | ۱/۰۰۴۷ | S22 | ۰/۱۱۹۹ |
| S21 | ۱/۲۲۷۶ | S20 | ۰/۲۵۱۷ |
| S25 | ۱/۸۴۵۳ | S18 | ۰/۱۶۵۹ |
| S24 | ۰/۴۳۰۷ | S16 | ۰/۰۸۱۲ |
| S19 | ۰/۳۷۹۳ | S11 | ۰/۱۲۰۷ |
| S15 | ۰/۸۴۷۴ | S12 | ۰/۲۰۷۲ |



Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.11- No.1- Spring & Summer 2014
[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

**جدول (۲): مقادیر وزن‌ها در اجرای دوم الگوریتم پیشنهادی برای شبکه‌ی توزیع ۱۶ باسه.**

| کلید | وزن | کلید | وزن |
|---|---|---|---|
| S26 | ۲/۷۱۵۷ | S13 | ۰/۳۳۷۵ |
| S17 | ۰/۶۹۳۹ | S23 | ۰/۳۵۹۰ |
| S14 | ۱/۵۳۷۹ | S22 | ۰/۱۱۶۷ |
| S21 | ۰/۹۳۷۷ | S20 | ۰/۲۴۹۳ |
| S25 | ۰/۹۷۹۳ | S18 | ۰/۱۲۵۸ |
| S24 | ۰/۳۴۲۶ | S16 | ۰/۰۷۰۲ |
| S19 | --- | S11 | ۰/۱۴۶۰ |
| S15 | ۳/۱۷۷۴ | S12 | ۰/۳۳۹۹ |

**جدول (۳): مقادیر وزن‌ها در اجرای سوم الگوریتم پیشنهادی برای شبکه‌ی توزیع ۱۶ باسه.**

| کلید | وزن | کلید | وزن |
|---|---|---|---|
| S26 | --- | S13 | ۰/۳۰۰۰ |
| S17 | ۰/۶۴۷۶ | S23 | ۰/۴۰۷۶ |
| S14 | ۱/۲۶۳۱ | S22 | ۰/۱۲۱۶ |
| S21 | ۰/۹۰۷۸ | S20 | ۰/۲۴۹۳ |
| S25 | ۱/۱۴۱۱ | S18 | ۰/۱۲۵۸ |
| S24 | ۰/۳۳۳۱ | S16 | ۰/۰۷۰۸ |
| S19 | --- | S11 | ۰/۱۳۹۸ |
| S15 | ۳/۱۷۵۰ | S12 | ۰/۳۳۹۶ |

**جدول (۴): مراحل الگوریتم پیشنهادی برای تجدید آرایش بر روی شبکه‌ی توزیع ۱۶ باسه.**

| مرحله | حلقه‌ی انتخاب شده | شماره‌ی باس $V_{min}$ | تلفات توان اهمی (kW) | کلیدهای نهایی باز شده |
|---|---|---|---|---|
| اول | S12, S15, S19, S18, S17, S21, S24, S23, S25, S26, S14, S13 | ۹ | ۴۵۶/۶۰ | S19 |
| دوم | S11, S22, S23, S25, S26, S14, S13 | ۷ | ۴۵۷/۴۳ | S26 |
| سوم | S16, S22, S24, S21, S17 | ۸ | ۴۶۶/۱۳ | S17 |

در اجرای دوم الگوریتم پیشنهادی، مقادیر وزن شاخه‌ها طبق جدول (۲) به‌روز می‌شوند. الگوریتم دایجکسترای اصلاح شده، حلقه‌ی شامل کلیدهای S13, S14, S26, S25, S23, S22 و S11 را انتخاب می‌کند. باس با کمترین ولتاژ، مربوط به باس ۷ است. با تکرار گام‌های بعدی کلید S26 انتخاب می‌شود و $N=۱$ می‌شود. سپس کلیدهای S19 و S26 به عنوان شرایط اولیه‌ی اجرای سوم الگوریتم پیشنهادی، در حافظه‌ی الگوریتم کروسکال حافظه‌دار ذخیره می‌شوند.

در اجرای سوم الگوریتم پیشنهادی، مقادیر وزن یال‌ها، مطابق جدول (۳) به‌روز می‌شوند و الگوریتم دایجکسترای اصلاح شده حلقه‌ی شامل کلیدهای S17, S21, S24, S22 و S16 را انتخاب می‌کند. باس ۸ به عنوان باس بعدی انتخاب می‌شود. با تکرار گام‌های بعدی کلید S17 انتخاب و $N$ برابر صفر می‌شود. با صفر شدن $N$، الگوریتم پیشنهادی پایان می‌پذیرد. در نهایت کلیدهای S19، S26 و S17 در حافظه‌ی الگوریتم کروسکال حافظه‌دار ذخیره شده‌اند. این کلیدها، کلیدهای نهایی برای باز شدن هستند.

در جدول (۴) مراحل اجرای الگوریتم پیشنهادی، بر روی شبکه ۱۶ باسه نشان داده شده است. الگوریتم پیشنهادی، به ساختار اولیه‌ی شبکه‌ی توزیع وابسته نیست. همانگونه که قبلاً ذکر شد بسیاری از روش‌های معتبر گزارش شده مانند [7]، [21] و [42] به ساختار اولیه شبکه وابسته‌اند، که جزء معایب این روش‌ها محسوب می‌شود.

## ۵- مطالعات عددی

برای بررسی روش پیشنهادی از چند شبکه‌ی نمونه استفاده شده است. این شبکه‌ها شامل شبکه‌هایی با اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ می‌باشند. شبیه‌سازی توسط یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار MATLAB در یک کامپیوتر پنتیوم ۴ با پردازشگر ۱/۸ گیگاهرتز و RAM 256 MB صورت گرفته است.

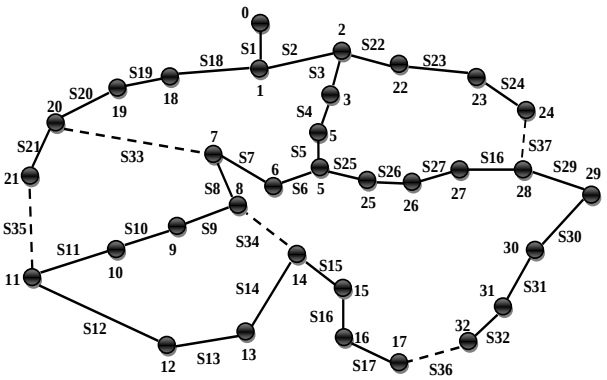
**شبکه‌ی الف)** شبکه‌ی نمونه‌ی ۱۶ باسه: این شبکه در بخش ۴ معرفی و جزئیات مراحل اجرای الگوریتم پیشنهادی روی آن ارائه شد. کمترین ولتاژ در حالت قبل از تجدید آرایش مربوط به باس ۱۲ و برابر ۰/۹۶۸۸ است. در حالت غربالی کمترین ولتاژ مربوط به باس۱۲ و برابر ۰/۹۷۷۷ می‌باشد. بعد از تجدید آرایش نیز کمترین ولتاژ مربوط به باس ۱۲ و برابر ۰/۹۷۰۷ می‌باشد.

در جدول (۵) مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از روش پیشنهادی و روش‌های دیگر روی این شبکه ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی در یک زمان بسیار کمتر نسبت به روش‌های دیگر به بهینه‌ی مطلوب دست پیدا کرده است. این زمان کم، حاصل ایده‌ی ابتکاری ارائه شده با تعداد پخش بار کمتر نسبت به روش‌های دیگر، می‌باشد.

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

**جدول (۵): مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی با دیگر روش‌ها روی شبکه‌ی توزیع ۱۶ باسه.**

| روش | تلفات نهایی (kW) | درصد کاهش تلفات (٪) | زمان پردازش (ثانیه) | کلیدهای باز شده |
|---|---|---|---|---|
| آرایش اولیه | ۵۱۱/۶۴ | --- | --- | S15, S21, S26 |
| Civanlar [4] | ۴۸۳/۶۰ | ۵/۴۸ | --- | S26, S17, S15 |
| الگوریتم جستجوی اجتماع مورچه‌ها [17] | ۴۶۶/۱۳ | ۸/۸۹ | ۱/۸۱ | S26, S17, S19 |
| الگوریتم ژنتیک [17] | ۴۶۶/۱۳ | ۸/۸۹ | ۲/۳۲ | S26, S17, S19 |
| سخت‌کاری فلزات [17] | ۴۶۶/۱۳ | ۸/۸۹ | ۲/۰۷ | S26, S17, S19 |
| Chang [27] | ۴۶۶/۱۳ | ۸/۸۹ | ۸/۳۰ | S26, S17, S19 |
| Rao [40] | ۴۶۶/۱۳ | ۸/۸۹ | ۴/۳۰ | S26, S17, S19 |
| Su [41] | ۴۶۶/۱۳ | ۸/۸۹ | ۷/۷۰ | S26, S17, S19 |
| Su [43] | ۴۶۶/۱۳ | ۸/۸۹ | ۱/۳۵ | S26, S17, S19 |
| Enacheanu [44] | ۴۶۶/۱۳ | ۸/۸۹ | ۲/۱ | S26, S17, S19 |
| پیشنهادی | ۴۶۶/۱۳ | ۸/۸۹ | ۰/۰۲۲ | S26, S17, S19 |




**شکل (۶): دیاگرام تک‌خطی شبکه‌ی توزیع ۳۳ باسه [35].**

**شبکه‌ی ب)** شبکه‌ی نمونه ۳۳ باسه: در این شبکه‌ی توزیع ۳۷ عدد کلید وجود دارد که در آرایش اولیه ۳۲ تا از آنها بسته و ۵ تا باز می‌باشند. دیاگرام تک‌خطی این شبکه ۱۲/۶۶ کیلوولتی در شکل (۶) نشان داده شده است. کل بارهای اکتیو و راکتیو آن به ترتیب ۵۰۵۸/۲۵ kW و ۲۵۴۷/۳۲ kVAr می‌باشد. اطلاعات مربوط به بار و ساختار این شبکه در مرجع [35] آمده است.

کلیدهای معمولاً باز آن شامل S37, S36, S35, S34 ، S33 و کلیدهای معمولاً بسته‌ی آن S1 تا S32 هستند. تلفات اولیه این شبکه ۲۰۲/۶۸ kW و تلفات غربالی آن ۱۲۳/۲۹ kW می‌باشد. با اجرای الگوریتم‌های پیشنهادی کلیدهای S32, S14, S9, S7 وS37 انتخاب می‌شوند. تلفات نهایی آن بعد از تجدید آرایش ۱۳۹/۵۵ kW است.

در جدول (۶) برای شبکه‌ی توزیع ۳۳ باسه، مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی و روش‌های دیگر انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در روش پیشنهادی ۳۱/۱۵ درصد کاهش تلفات نسبت به حالت اولیه‌ی شبکه داشته است که بیشترین درصد کاهش تلفات بوده و در مقایسه با روش‌های دیگر در کم‌ترین زمان، حاصل شده است.

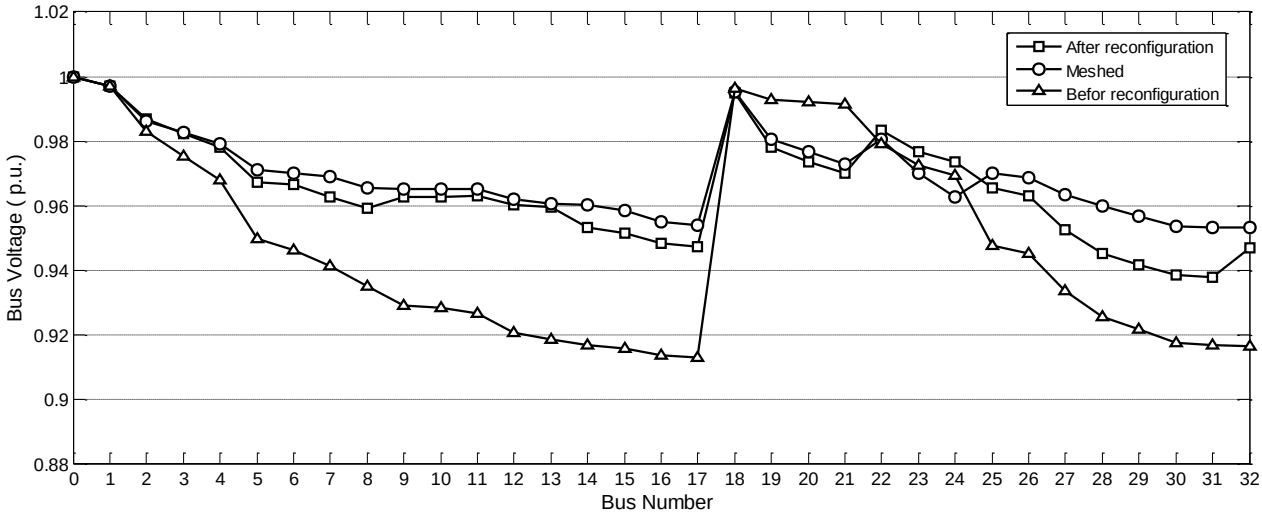
در شکل (۷) پروفیل ولتاژ این شبکه در سه وضعیت قبل و بعد از تجدید آرایش و نیز در حالت غربالی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، پروفیل ولتاژ در حالت نهایی به حالت غربالی بسیار نزدیک‌تر است. در حالت غربالی بهترین پروفیل ولتاژ را داریم و اساس روش پیشنهادی این مقاله بر این است که کمترین اغتشاش ممکن به سیستم غربالی وارد شود. لذا بهبود پروفیل ولتاژ دور از انتظار نیست.

**جدول (۶): مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی با روش‌های دیگر بر روی شبکه‌ی توزیع ۳۳ باسه.**

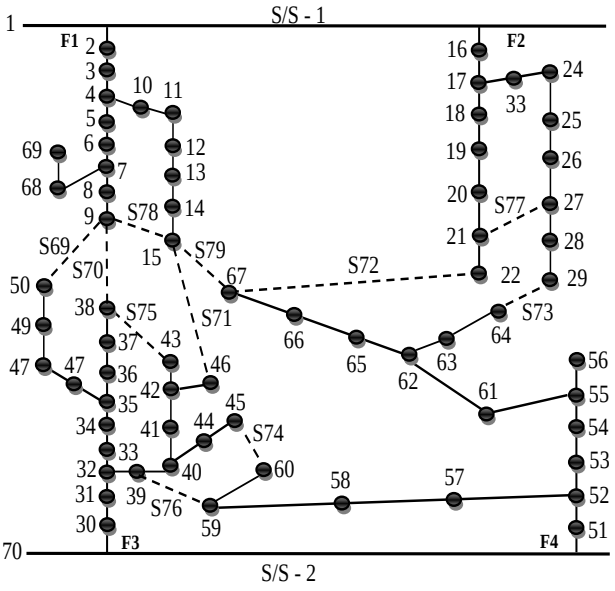
| روش | تلفات نهایی (kW) | درصد کاهش تلفات (٪) | زمان پردازش (ثانیه) | کلیدهای باز شده |
|---|---|---|---|---|
| آرایش اولیه | ۲۰۲/۶۸ | --- | --- | S33, S34, S35, S36, S37 |
| بهینه‌ی مطلق [37] | ۱۳۹/۵۵ | ۳۱/۱۵ | ۶۴۷/۰۳ | S7, S9, S14, S32, S37 |
| Shirmohamadi [8] | ۱۴۰/۲۸ | ۳۰/۷۸ | ۰/۱۴ | S7, S10, S14, S32, S37 |
| Niknam [29] | ۱۳۹/۵۵ | ۳۱/۱۵ | ۸ | S7, S9, S14, S32, S37 |
| Niknam [30] | ۱۳۹/۵۵ | ۳۱/۱۵ | ۵ | S7, S9, S14, S32, S37 |
| Goswami [33] | ۱۳۹/۵۵ | ۳۱/۱۵ | ۰/۸۷ | S7, S9, S14, S32, S37 |
| Gomes [37] | ۱۳۹/۵۵ | ۳۱/۱۵ | ۱/۶۶ | S7, S9, S14, S32, S37 |
| Gomes [38] | ۱۴۰/۲۸ | ۳۰/۷۸ | ۰/۹۶ | S7, S10, S14, S32, S37 |
| McDermott [39] | ۱۳۹/۵۵ | ۳۱/۱۵ | ۱/۹۹ | S7, S9, S14, S32, S37 |
| Ramos [42] | ۱۳۹/۵۵ | ۳۱/۱۵ | ۰/۸ | S7, S9, S14, S32, S37 |
| Enacheanu [44] | ۱۳۹/۵۵ | ۳۱/۱۵ | ۷/۲ | S7, S9, S14, S32, S37 |
| پیشنهادی | ۱۳۹/۵۵ | ۳۱/۱۵ | ۰/۱۱ | S7, S9, S14, S32, S37 |



[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]




**شکل (۷): پروفیل ولتاژ شبکه‌ی توزیع ۳۳ باسه در سه وضعیت قبل و بعد از تجدید آرایش و نیز حالت غربالی.**




**شکل (۸): دیاگرام تک‌خطی شبکه‌ی توزیع ۷۰ باسه [20].**

**شبکه‌ی ج)** شبکه‌ی نمونه ۷۰ باسه: در این شبکه‌ی توزیع ۷۹ عدد کلید وجود دارد که در آرایش اولیه ۶۸ تا از آنها بسته و ۱۱ تا باز می‌باشند. دیاگرام تک خطی این شبکه‌ی ۱۱ کیلوولتی در شکل (۸) نشان داده شده است.

در جدول (۷) مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از روش تجدید آرایش پیشنهادی و روش‌های دیگر برای شبکه‌ی توزیع ۷۰ باسه، ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تلفات در آرایش حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر کمتر است ضمن اینکه روش پیشنهادی توانسته است در زمان بسیار کمتری در مقایسه با روش‌های دیگر به پاسخ نهایی دست یابد. این امر برتری این الگوریتم را از دیدگاه سرعت و دقت، نسبت به دیگر روش‌ها نشان می‌دهد.

در شکل (۹) پروفیل ولتاژ شبکه‌ی توزیع ۷۰ باسه در سه وضعیت قبل و بعد از اعمال تجدید آرایش و نیز حالت غربالی نشان داده شده اســت. همان طور که مشاهده می‌شود پروفیل ولتاژ در حالت نهایی به حالت غربالی بسیار نزدیکتر است و کمترین ولتاژ در حالت بعد از تجدید آرایش، ۰/۹۲۷۱ پریونیت و مربوط به باس ۲۹ می‌باشد.

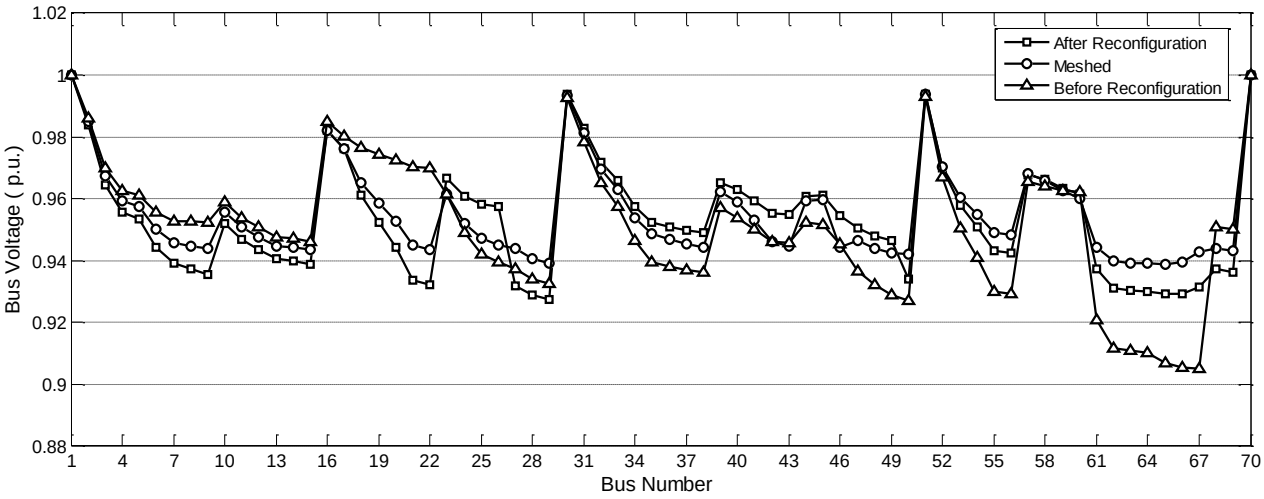
## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی کارا برای تجدید آرایش شبکه‌های توزیع مبتنی بر الگوریتم‌های توسعه یافته‌ی نظریه‌ی گراف و مفهوم اغتشاش، ارائه شد. در روش پیشنهادی شبکه به صورت یک ابرگراف مدل می‌شود و وزن‌هایی متناسب با تلفات به هر یک از شاخه‌های گراف نسبت داده می‌شود. در این روش وابستگی به ساختار اولیه شبکه وجود ندارد و با توجه به اینکه در روش پیشنهادی، آرایش نهایی شبکه یک درخت فراگیر است، لذا ساختار نهایی شبکه شعاعی خواهد بود و بدلیل فراگیر بودن درخت تولید شده، تغذیه‌ی تمامی بارها تضمین خواهد شد. نتایج حاصل از اعمال این الگوریتم روی شبکه‌های نمونه نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از سرعت و دقت بالا و قابل قبولی برخوردار است. با توجه به ماهیت نظریه‌ی گراف و الگوریتم‌های سریع آن، روش ارائه شده در این مقاله هیچ محدودیتی در ارتباط با اندازه و گستردگی شبکه‌ی توزیع ندارند و به علت تعداد کم محاسبات پخش بار، از سرعت بسیار مناسبی برخوردار است. از این رو برای کاربردهای عملی در زمان واقعی برای سیستم‌های توزیع بزرگ مناسب می‌باشد.

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

**جدول (۷): مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی باروش‌های دیگر بر روی شبکه‌ی توزیع ۷۰ باسه.**

| روش | تلفات نهایی (kW) | درصد کاهش تلفات اهمی (%) | زمان پردازش (ثانیه) | کلیدهای باز شده |
|---|---|---|---|---|
| آرایش اولیه | ۲۲۷/۵۳ | --- | --- | $S_{29-64}$, $S_{22-67}$, $S_{15-67}$, $S_{9-38}$, $S_{9-15}$, $S_{9-50}$, $S_{38-43}$ $S_{21-27}$, $S_{39-59}$, $S_{45-60}$, $S_{15-46}$, |
| Das [20] | ۲۰۵/۳۲ | ۹/۷۶۱ | ۳ | $S_{9-38}$, $S_{29-64}$, $S_{49-50}$, $S_{26-27}$, $S_{15-67}$, $S_{65-66}$, $S_{15-46}$ $S_{39-59}$, $S_{14-15}$, $S_{37-38}$, $S_{44-45}$, |
| Niknam [30] | ۲۰۵/۳۲ | ۹/۷۶۱ | ۶ | $S_{9-38}$, $S_{29-64}$, $S_{49-50}$, $S_{26-27}$, $S_{15-67}$, $S_{65-66}$, $S_{15-46}$ $S_{39-59}$, $S_{14-15}$, $S_{37-38}$, $S_{44-45}$, |
| Niknam [31] | ۲۰۵/۳۲ | ۹/۷۶۱ | ۸ | $S_{9-38}$, $S_{29-64}$, $S_{49-50}$, $S_{26-27}$, $S_{15-67}$, $S_{65-66}$, $S_{15-46}$ $S_{39-59}$, $S_{14-15}$, $S_{37-38}$, $S_{44-45}$, |
| پیشنهادی | ۲۰۴/۸۳ | ۹/۹۷۶ | ۰/۸۸ | $S_{9-38}$, $S_{29-64}$, $S_{49-50}$, $S_{26-27}$, $S_{15-67}$, $S_{65-66}$, $S_{15-46}$ $S_{39-59}$, $S_{15-9}$, $S_{38-43}$, $S_{40-44}$, |




**شکل (۹): پروفیل ولتاژ شبکه‌ی توزیع ۷۰ باسه در سه وضعیت قبل و بعد از تجدید آرایش و نیز حالت غربالی.**

## مراجع


[1] Y. Qin and J. Wang, "Distribution network reconfiguration based on particle clonal genetic algorithm," Journal of computers, vol. 4, no. 9, pp. 813-820, Sep. 2009.

[2] P. V. V. Rama Rao and S. Sivanagaraju, "Radial distribution network reconfiguration for Loss reduction and load balancing using plant growth simulation algorithm," International Journal on Electrical Engineering and Informatics, vol. 2, no. 4, pp. 266-277, Nov. 2010.

[3] E. Dolatdar, S. Soleymani, and B. Mozafari, "A new distribution network reconfiguration approach using a tree model," World Academy of Science, Engineering & Technology, vol. 58, no. 5, pp. 1186-1193, Oct. 2009.

[4] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, and S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3 , no. 3, pp. 1217–1223, Jul. 1988.

[5] Q. Zhou, D. Shirmohammadi, and W. H. Liu, "Distribution feeder reconfiguration for service restoration and load balancing," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 2, pp. 724-729, May. 1997.

[6] E. Lopez, H. Opazo, L. Garcia, and P. Bastard, "Online reconfiguration considering variability demand: Applications to real networks," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 1, pp. 549–553, Feb. 2004.


[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

[7] Y. T. Hsiao, "Multiobjective evolution programming method for feeder reconfiguration," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 1, pp. 594–599, Feb. 2004.
[8] D. Shirmohammadi and H. W. Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1492–1498, Apr. 1989.
[9] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, and T. Ishihara, "Implementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum reconfiguration," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, no. 3, pp. 1044–1051, Aug. 1992.
[10] M. Assadian, M. M. Farsangi, and H. Nezamabadi-pour, "GCPSO in cooperation with graph theory to distribution network reconfiguration for energy saving," Energy Conversion and Management, vol. 51, no. 3, pp. 418–427, March. 2010.
[11] Y. C. Huang, "Enhanced genetic algorithm-based fuzzy multi-objective approach to distribution network reconfiguration," IEE Proceeding Generation, Transmission & Distribution, vol. 149, no. 5, pp. 615–620, Apr. 2002.
[12] W. M. Lin, F. S. Cheng and M. T. Tsay, "Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm," IEE Proceeding Generation, Transmission & Distribution, vol. 147, no. 6, pp. 349–54, Nov. 2000.
[13] J. Mendoza, R. Lopez, D. Morales, E. Lopez, P. Dessante, and R. Moraga, "Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: Real application", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 2, pp. 948–954, May. 2006.
[14] A. Y. Abdelaziz, F. M. Mohammed, S. F. Mekhamer, and M. A. L. Badr, "Distribution systems reconfiguration using a modified particle swarm optimization algorithm," Electric Power Systems Research, vol. 79, no. 11, pp. 1521–1530, Nov. 2009.
[۱۵] روشنفکر. رضا ، سیاهکلی. حسین، "طراحی شبکه توزیع در چند سطح ولتاژ با استفاده از الگوریتم‌های تعیین سطح تغذیه و PSO"، نشریه انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال دوم، شماره اول، تابستان ۱۳۸۴.
[16] E. Carpaneto and G. Chicco, "Distribution system minimum loss reconfiguration in the Hyper-Cube ant colony optimization framework," Electric Power Systems Research, vol. 78, no. 12, pp. 2037–2045, Dec. 2008.
[17] C. T. Sua, C. U. Changb, and J. P. Chiou, "Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm," Electric Power Systems Research, vol. 75, no. 23, pp. 190–199, Aug. 2005.
[18] D. Das, "Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 28, no. 5, pp. 331-338, June. 2006.
[19] J. S. Savier and D. Das, "Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, pp. 2473–2480, Oct. 2007.
[20] D. Das, "A fuzzy multi-objective approach for network reconfiguration of distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 1, pp. 202–209, Jun. 2006.
[21] D. Bouchard, V. L. Chikhani, V. L. John, and M. M. A. Salama, "Applications of Hopfield neural-networks to distribution feeder reconfiguration," in Proceeding 2nd IEEE International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems, pp. 311–316, 1993.
[22] K. K. Kim and K. H. Hung, "Artificial neural network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution system," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 3, pp. 1356–1366, Jul. 1993.
[23] H. Salazar, R. Gallego, and R. Romero, "Artificial neural networks and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 3, pp. 1735–1742, Jul. 2006.
[24] K. H. Jung, H. Kim, and Y. KO, "Network reconfiguration algorithm for automated distribution systems based on artificial intelligent approach," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 4, pp. 1933–1941, Oct. 1993.
[25] H. D. Chiang and R. M. Jean-Jameau, "Optimal network reconfigurations in distribution systems, part 2: Solution algorithms and numerical results," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 3, pp. 1568–1574, Jul. 1990.
[26] H. D. Chiang and R. M. Jean-Jameau, "Optimal network reconfiguration in distribution systems, part 1: A new formulation and a solution methodology," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 4, pp. 1902–1909, Oct. 1990.
[27] H. C. Chang and C. C. Kuo, "Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing," Electric Power Systems Research, vol. 29, no. 3, pp. 227-238, May. 1994.
[28] Y. J. Jeon, J. C. Kim, J. O. Kim, J. R. Shin, and K. Y. Lee, "An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 4, pp. 1070–1078, Oct. 2002.
[29] T. Niknam, "An efficient hybrid evolutionary algorithm based on PSO and ACO for distribution feeder reconfiguration," European Transactions on Electrical Power, vol. 20, no. 5, pp. 575-590, Jul. 2010.
[30] T. Niknam, "A new hybrid algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration," Cybernetics and Systems: An International Journal, vol. 40, no. 6, pp. 508-527, Aug. 2009.
[31] T. Niknam, "An efficient hybrid algorithm based on PSO and HBMO algorithms for multi-objective distribution feeder reconfiguration," Energy Conversion and Management, vol. 50, no. 8, pp. 2074–2082, Aug. 2009.
[32] C. F. Chang and J. P. Chiou, "Optimal feeder reconfiguration for loss reduction by robust searching hybrid differential evolution," Cybernetics and Systems: An International Journal, vol. 38, no. 4, pp. 429–450, Apr. 2007.
[33] S. K. Goswami and S. K. Basu, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 3, pp. 1484–1491, Jul. 1992.
[۳۴] ضرابی‌زاده. حمید (مترجم)، باندی و مورتی (مؤلف)، "نظریه‌ی گراف و کاربردهای آن"، انتشارات مؤسسه‌ی فرهنگی هنری دیباگران تهران، ۱۳۸۵.
[35] M. E. Baran and F. F.Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, Apr. 1989.

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

[36] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and D. Gan, Matpower [Online]. Available: http://www.pserc.cornell.edu/matpower/.
[37] F. V. Gomes, S. Carneiro, J. L. R. Pereira, M. P. Vinagre, and P. A. N. Garcia, "A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 3, pp. 1373–1378, Aug. 2005.
[38] F. V. Gomes, S. Carneiro, J. L. R. Pereira, M. P. Vinagre, and P. A. N. Garcia, "A new distribution system reconfiguration approach using optimum power flow and sensitivity analysis for loss reduction," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 4, pp. 1616–1623, Nov. 2006.
[39] T. E. McDermott, I. Drezga, and R. P. Broadwater, "A heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 2, pp. 478–483, May. 1999.
[40] R. S. Rao, S. V. L. Narasimham, M. Ramalingaraju, "Optimization of distribution network configuration for loss reduction using artificial bee colony algorithm", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 1, no. 2, pp. 116-122, Sep. 2008.
[41] C. T. Su and C. S. Lee, "Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 3, Jul. 2003.
[42] E. R. Ramos, A. G. Exposito, J. R. Santos and F. L. Iborra, "Path-Based distribution network modeling: Application to reconfiguration for loss reduction," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 2, pp. 556–564, May. 2005.
[43] C. T. Su, C. U. Chang, and C. S. Lee, "Distribution network reconfiguration for loss reduction by hybrid differential evolution," Electric Power Components and Systems, vol.33, no. 12, pp. 1297–1312, Feb. 2005.
[44] B. Enacheanu, B. Raison, R. Caire, O. Devaux, W. Bienia, and N. HadjSaid, "Radial network reconfiguration using genetic algorithm based on the matroid theory," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 1, pp. 168–195, Feb. 2008..

## زیرنویس‌ها

[1] Kruskal's algorithm
[2] Reformed Dijkstra's algorithm

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]