

بهره‌برداری بهینه از ریزشبه‌های چندگانه تحت قابلیت اطمینان شبکه مبتنی بر الگوریتم تولیدمثل غیرجنسی

حسین شهامتی نژاد^۱، سید محمد صادق زاده^۲

چکیده

امروزه تعداد ریزشبه‌های توزیع رو به افزایش است. در این میان به دلایل مختلف که در حوزه شبکه‌های هوشمند و بازار برق قابل توجه است بهره‌برداری بهینه از این ریزشبه‌ها دارای اهمیت بالایی می‌باشد. از طرفی وجود حوادث با شدت بالا دلایل ایجاد ریزشبه‌ها در بسیاری از کشورها بوده است که اهمیت بهره‌برداری از ریزشبه‌های چندگانه جهت مقابله با این حوادث را نشان می‌دهد. در این مقاله بهره‌برداری بهینه از ریزشبه‌های به هم پیوسته جهت پاسخگویی به شرایط عادی و بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که ریزشبه‌های چندگانه می‌توانند متصل به شبکه اصلی و نیز متصل به هم باشند بنابراین ایجاد شرایط بهره‌برداری مناسب ضمن حفظ مستقل بودن آنها مورد توجه می‌باشد. هدف در این مقاله بهینه‌سازی در شرایط قابلیت اطمینان شبکه می‌باشد. در این حالت کلیدهای بین ریزشبه‌ها یکی از مواردی است که برای تامین شرایط بهینه‌سازی ریزشبه‌ها مورد توجه است. در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و تاثیرپذیری قابلیت اطمینان ناشی از این منابع، شبیه‌سازی با ایجاد سناریو و اعمال به برنامه بهینه‌سازی انجام شده است. تابع هدف بهینه‌سازی توسط یک الگوریتم تکاملی به نام تولید مثل غیر جنسی صورت گرفته است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۰/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۰۹/۲۸

کلمات کلیدی:

بهره‌برداری ریز
شبکه،

ریزشبه های

چندگانه،

قابلیت

اطمینان،

الگوریتم

.ARO

^۱ دانشجوی دکتری دانشگاه شاهد، تهران، ایران، کد پستی ۱۸۶۵۱۳۳۱۹۱، (email: a.shahamati.nezhad@gmail.com)

^۲ دانشیار دانشگاه شاهد، تهران، ایران، کد پستی ۱۸۶۵۱۳۳۱۹۱، (email: sadeghzadeh@shahed.ac.ir)

۱. مقدمه

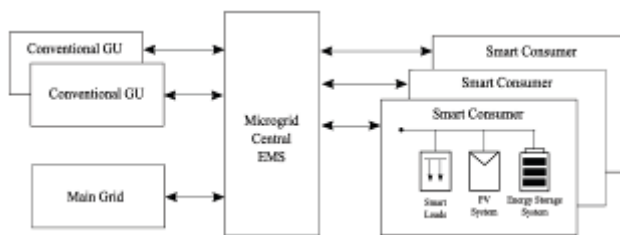
با توجه به حضور ریز شبکه‌ها^۳ به عنوان یک بازیگر مهم در بهره برداری سیستم های توزیع انرژی نسل جدید و ایجاد بازار انرژی همچنین با توجه به قابلیت های فراوان ریز شبکه‌ها در سیستم های توزیع و به طور کلی شبکه های هوشمند، بهره برداری از این چنین سیستم ها دارای چالش ها و فرصت های بسیاری نسبت به نسل مرسوم سیستم های توزیع خواهند بود. با توجه به وجود انواع مختلف منابع تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر و قابلیت جزیره سازی ریز شبکه ها، بررسی مساله ی در مدار قرارگیری منابع تولید پراکنده در ریز شبکه ها و به دنبال آن مشارکت ریز شبکه ها در شبکه ی توزیع هوشمند ضروری به نظر می رسد.

مرجع [۲] با ارایه ی مدل دوسطحی برای مساله ی بهره برداری بهینه سازی انجام داده است. به طوری که سود شرکت توزیع مسئله ی سطح بالا و سطح پایین مساله در مورد هزینه ی ریز شبکه ها است. نقش تاثیر گذار ساختار بازار انرژی در سود و هزینه های ریز شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. افزایش قابلیت اطمینان با ارایه یک مدل احتمالی برای بار و منابع انرژی، به عنوان یک هدف برای بهینه سازی یک شبکه با ریز شبکه های به هم متصل در مرجع [۳] بررسی شده است.

برای یک شبکه با چند ریز شبکه ی متصل به هم یک مدل جدید برای مطالعه تلفات و قابلیت اطمینان تحلیل و بررسی شده است [۴]. مرجع [۵] بهره برداری از چندین ریز شبکه با منابع تجدید پذیر مختلف به طوری که از شبکه ی توزیع اصلی مستقل هستند بررسی کرده است. بهینه سازی توان مبادله ای بین چند ریز شبکه که به هم دیگر متصل هستند با هدف حداقل سازی هزینه ی بهره برداری در مرجع [۶] مورد مطالعه قرار گرفته است. استراتژی برای شارژ کردن و دشارژ کردن خودرو های برقی در شبکه های با چندین ریز شبکه ی به هم پیوسته در با در نظر گرفتن عدم قطعیت در بیشتر پارامتر های بهینه سازی در نظر گرفته شده است [۷]. در مرجع [۸] برای مدیریت منابع پراکنده ی متفاوت در ریز شبکه ها یک روش کنترلی همراه با بار های پاسخ گو و ذخیره ساز ها، ارایه شده است. در مرجع [۹] برای کنترل توان عبوری بین ریز شبکه ها در یک سیستم با چند ریز شبکه یک مساله ی بهینه سازی حل شده است. به دلیل وجود عدم قطعیت در سیستم هوشمند با چند ریز شبکه مساله ی پخش بار در [۱۰] به صورت احتمالی انجام شده است. داد و ستد و معامله ی توان بین ریز شبکه ها در یک محیط تجدید ساختار یافته در مرجع [۱۱] ارایه شده است. در یک شبکه ی توزیع با چند ریز شبکه ی به هم متصل شاخص های قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار گرفته شده است [۱۲]. در مرجع [۱۳] بهره برداری و برنامه ریزی شبکه ای با یک ریز شبکه و شبکه های با چندین ریز شبکه در محیط بازار انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۱۴] تابع هدف حداقل سازی قیمت برق بر اساس هزینه ی انتقال توان در شبکه است. در مقاله ی [۱۵] توان مبادله شده بین چندین ریز شبکه مطالعه شده است که ریز شبکه ها به عنوان فروشنده ی توان یا خریدار آن مدل شده است. بهره برداری در زمان وقوع حوادث غیر مترقبه در شبکه ای با چند ریز شبکه مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶].

در مقاله ی [۱۷] برای مدیریت انرژی ریز شبکه هایی با بار خانگی با خطی سازی مساله مدل مساله به صورت خطی همراه با متغیر صحیح آمیخته مدل سازی شده است. هدف مساله ی پیشنهاد شده حداقل سازی هزینه ی بهره برداری از سیستم با در نظر گرفتن قیود مختلف بهره برداری و امنیت است. شکل (۱) برنامه ریزی منابع تولید توان مختلف اعم از قابل کنترل و غیر قابل کنترل در مدار قرار گیری واحد های تولید توان در مدیریت انرژی سیستم توزیع انرژی نشان می دهد.

مرجع [۱۸] مروری در زمینه ی کاربرد برنامه ریزی آمیخته عدد صحیح در مورد حل مساله مشارکت روزانه واحد های تولید توان با در نظر گرفتن قید امنیت و با در نظر داشتن توربین بادی و منابع تولیدی گرما انجام داده است.



شکل (۱): ساختار سیستم مدیریت انرژی پیشنهاد شده توسط [۱]

مقاله ی [۱۹] مدل خطی آمیخته با عدد صحیح بهبود یافته برای برنامه ریزی بهینه ی پخش بار اقتصادی و مشارکت یا در مدار قرارگیری واحد های تولید توان در ریزشبكة با هدف حداقل سازی هزینه های بهره برداری، نگه داری و تلفات ۴ و... با تمرکز بر حداقل کردن وابستگی ریزشبكة ها به شبکه ی اصلی توزیع ارایه کرده است.

نویسندگان [۲۰] با معرفی ریزشبكة با ساختار انرژی چندگانه برای افزایش کنترل پذیری و انعطاف منابع تولید توان الکتریکی، گرمایی و حداقل سازی هزینه ی کل بهره برداری شبکه یک روش جدید پیشنهاد کرده است.

مرجع [۲۱] در مدار قرار گیری یا مشارکت نیروگاه بر اساس سود را برای ریزشبكة های صنعتی معرفی کرده است، به طوری که در فرمول بندی این مساله قیود امنیت و قیود مربوط به کارخانه ها رعایت شده و در مساله ی پیشنهاد شده از گرمای تلف شده ی نیروگاه ها در مکان های مورد نیاز استفاده می شود.

با مرور مراجع پیشین مشخص شد مراجع اندکی در مورد در بهره برداری واحد های تولید پراکنده مختلف در شبکه ای با چند ریز شبکه و هم چنین مشارکت ریزشبكة ها در بهره برداری بهینه از یک شبکه ی هوشمند تحقیق و مطالعه کرده است و در مقالات اشاره شده پروفیل های ۲۴ ساعته بار های گوناگون به طور کامل بررسی نشده است. در مقاله پیشرو با فرض وجود کاربری های مختلف و منحنی های مختلف بار در ۲۴ ساعت شبانه روز در هر ریزشبكة به طوری که تمام بار های خانگی، صنعتی، خانگی و دانشگاهی در ریزشبكة ها به طور جداگانه فرض شده هم چنین انواع مختلف منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر در ریزشبكة ها فرض شده و مساله ی مشارکت ریزشبكة ها مطالعه می شود.

۲. مدل سازی مساله مشارکت بهینه ریزشبكة ها در برنامه ریزی روزانه یک شبکه توزیع هوشمند

فرض کنید که یک شبکه توزیع دارای تعدادی ریز شبکه است به طوری که این ریزشبكة از یک یا چند نقطه به شبکه توزیع اصلی و یا به ریزشبكة های دیگر متصل باشد. در این حالت با توجه به شرایط مختلف بهره برداری این امکان وجود خواهد داشت که هر کدام از ریزشبكة با تعیین حالات کلیدهای بین ریزشبكة ها به ساختارهای مختلفی تبدیل شده و شرایط خاص بهره برداری را تامین کنند. برخی از این شرایط خاص می توانند به صورت زیر باشد:

- ۱- یک یا مجموعه ای از ریزشبكة ها از شبکه اصلی جدا شده و به صورت یک مجموعه مستقل به بهره برداری خود ادامه دهند.
- ۲- یک یا تعدادی از ریز شبکه ها به دلیل مباحث قیمت انرژی ترجیح دهند که از شبکه جدا شوند.
- ۳- فروش انرژی بین ریزشبكة های مجاور و یا ریزشبكة هایی که باهم ارتباط غیر مستقیم از طریق ریزشبكة های دیگر دارند اتفاق بیفتد.
- ۴- ریزشبكة ای اجازه ترانزیت انرژی را از بستر خود ندهد.
- ۵- به دلایل خاص مانند بهبود تاب آوری سیستم یک یا مجموعه ریزشبكة ها ساعات طولانی و خاصی را به صورت متصل به شبکه و یا منفصل از آن کار کنند.

در هر کدام از حالات فوق بهره بردار شبکه توزیع باید امکان کنترل ریزشبكة ها و یا مجموعه آنها را از نظر اتصال به شبکه و یا کار در حالت جزیره ای و یا تامین شرایط تاب آوری فراهم نماید. بر این اساس بایستی شرایط به مدار آوردن و یا مشارکت هر کدام از ریزشبكة ها در حالات مختلف بهره برداری با حفظ سایر قیود فراهم شود. از این منظر هر کدام از ریزشبكة ها مانند یک نیروگاه مجازی و مستقل امکان مشارکت و یا جدا شدن از شبکه را داشته باشند. هر کدام از ریز شبکه ها دارای منابع تامین انرژی خود می باشد که می تواند در شرایط مختلف مورد بهره برداری قرار گیرد. از طرفی تمامی منابع در تمامی ریزشبكة ها موجود نمی باشند بنابراین هر کدام از ریزشبكة ها دارای پتانسیل متفاوت در بهره برداری می باشند که می توانند به کمک هم آمده و شرایط بهره برداری بهتری را فراهم نمایند.

در این قسمت مدل ریاضی مشارکت بهینه ریزشبهه ها در یک شبکه توزیع هوشمند مدلسازی می گردد. فرض کنید که یک شبکه توزیع دارای MG عدد ریزشبهه باشد به طوری که از یک یا چند نقطه به شبکه توزیع اصلی و یا به ریزشبهه‌های دیگر متصل باشند.

فرض کنید که هر ریز شبکه دارای منابع انرژی تجدید پذیر مانند توربین بادی (WT) و سلولهای خورشیدی (PV) و تعدادی منابع قابل کنترل مانند تولید همزمان برق و حرارت (CHP)، میکروتوربین (MT) ویا پیل سوختی (FC) باشد. از آنجا که برای هر یک از توان تولیدی هر کدام از منابع تجدید پذیر و نیز بار شبکه در حضور عدم قطعیت مدل سازی شده است لذا با تولید سنارو و کاهش آن به تعداد محدود ۲۰ نتایج در هر ساعت بر اساس تعداد سناریوها اجرا شده است لذا پارامتر s معرف سناریو در این مدلسازی بکار رفته است.

توان تولیدی هر ریزشبهه mg در ساعت t و سناروی s در حالت کلی می تواند از رابطه زیر محاسبه گردد.

$$\begin{aligned} P_{mg,t,s} &= v_{chp}(t)P_{chp,t,s} + v_{FC}(t)P_{FC,t,s} + \\ &v_{MT}(t)P_{MT,t,s} + v_{WT}(t)P_{WT,t,s} + v_{PV}(t)P_{PV,t,s} \\ &= \sum_{der=1}^{N_{DER}} P_{der,m,t,s} \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن پارامتر باینری v پارامتری است که در مدار بودن و یا نبودن هر یک از منابع را در ریز شبکه m بیان می کند. $P_{chp,t,s}$, $P_{FC,t,s}$, $P_{MT,t,s}$, $P_{WT,t,s}$ و $P_{PV,t,s}$ به ترتیب توانهای تولید هر کدام از منابع را در ساعت t و سناروی s بیان می کنند. در رابطه فوق $P_{der,m,t,s}$ توان تولیدی هر کدام از منابع انرژی در ریز شبکه m است و N_{DER} تعداد این منابع در ریزشبهه m می باشد. بدیهی است که هر کدام از منابع در برخی از ریزشبهه ها موجود می باشند و ممکن است در ریزشبهه دیگر موجود نباشند که در این صورت مقادیر آنها در تمام طول مطالعه صفر فرض می گردد. برای هر ریز شبکه m بار هر باسبار b با $P_{Lb,t}$ بیان می گردد. در این حالت بار کل هر ریز شبکه در ساعت t از رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$P_{LM,t} = \sum_b^{B_m} P_{Lb,t} \quad (2)$$

که در آن B_m تعداد کل باسبارهای ریزشبهه m است.

برای هر ریز شبکه در حالت متصل به شبکه اصلی و یا متصل به ریزشبهه های دیگر معادله تعادل توان به صورت زیر است. در صورتیکه ریز شبکه در حالت متصل به شبکه و نیز متصل به ریزشبهه های دیگر باشد معادله تعادل توان از رابطه (۳) محاسبه خواهد شد.

$$\begin{aligned} \sum_{der=1}^{N_{DER}} P_{der,m,t,s} &= \sum_b^{B_m} P_{Lb,t} + P_{Loss_{m,t,s}} \\ &+ D_{Net,t,s} \times P_{Net,t,s} + \sum_{\substack{mc=1 \\ mc \neq m}}^{M_C} D_{mc,t,s} P_{mc,t,s}^{Tr} \end{aligned} \quad (3)$$

در معادله (۳) $D_{Net,t}$ یک عدد صحیحی از مجموعه $(-1, 0, 1)$ انتخاب می گردد و نحوه جهت عبور توان بین ریزشبهه و شبکه اصلی را نشان می دهد. همچنین $D_{mc,t,s}$ عدد صحیحی از مجموعه $(-1, 0, 1)$ بوده و نحوه عبور ترانزیت توان و انرژی بین ریزشبهه و ریزشبهه های همسایه را در ساعت t نشان می دهد. $P_{Net,t}$ توان مبادله شده ریزشبهه با شبکه اصلی و $P_{mc,t,s}^{Tr}$ توان تبادلی بین ریزشبهه‌های مجاور و M_C تعداد ریزشبهه های متصل به ریزشبهه m است.

در صورتی که ریز شبکه به تنهایی و مستقل در حالت جزیره ای باشد در این صورت شاخصهای D_m و D_{Net} برای هر لحظه زمانی صفر خواهد شد و معادله فوق به صورت زیر تقلیل خواهد یافت.

$$\sum_{der=1}^{N_{DER}} P_{m,t,DER} = \sum_b^{B_m} P_{Lb,t} + P_{m,t,Loss} \quad (۴)$$

اگر ریز شبکه فوق فقط با شبکه بالادستی مبادله توان داشته باشد در این صورت معادله توان به صورت (۵) خواهد بود.

$$\sum_{der=1}^{N_{DER}} P_{der_{m,t,s}} = \sum_b^{B_m} P_{Lb,t} + P_{Loss_{m,t,s}} + D_{Net_{m,t,s}} \times P_{Net_{m,t,s}} \quad (۵)$$

و در صورتی مجموعه ریز شبکه ها با شبکه توزیع تبادل توان نداشته باشد ولی فقط با یک یا چند ریز شبکه دیگر تبادل توان داشته باشد، معادله به صورت (۶) خواهد بود.

$$\sum_{der=1}^{N_{DER}} P_{der_{m,t,s}} = \sum_b^{B_m} P_{Lb,t} + P_{Loss_{m,t,s}} + \sum_{\substack{mc=1 \\ mc \neq m}}^{M_c} D_{mc,t,s} P_{mc,t,s}^{Tr} \quad (۶)$$

برای یک شبکه توزیع با تعداد MG ریز شبکه معادله تعدل توان را می توان به صورت زیر نیز بیان کرد.

$$\sum_{m=1}^{MG} P_{m,t,s} = \sum_{m=1}^{MG} P_{Lm,t,s} + P_{Loss_{m,t,s}} \quad (۷)$$

با جایگزینی روابط (۲) در معادله (۵) :

$$\sum_{m=1}^{MG} \sum_{der=1}^{N_{DER}} P_{der_{m,t,s}} = \sum_{m=1}^{MG} \sum_b^{B_m} P_{Lb,m,t,s} + \sum_{m=1}^{MG} P_{Loss_{m,t,s}} \quad (۸)$$

معادله فوق بعنوان مهمترین قید تساوی در مدلسازی وارد می گردد.

هر کدام از واحدهای قابل کنترل در داخل ریز شبکه ها دارای توان تولید حداقل و حداکثر می باشند که به صورت زیر بیان می گردد.

$$\begin{aligned} \forall m \in MG : \\ v_{CHP}(t).P_{CHP_{m,t,s}}^{\min} \leq P_{CHP_{m,t,s}}(t) \leq v_{CHP}(t).P_{CHP_{m,t,s}}^{\max} \\ v_{MT}(t).P_{MT_{m,t,s}}^{\min} \leq P_{MT_{m,t,s}}(t) \leq v_{MT}(t).P_{MT_{m,t,s}}^{\max} \quad (۹) \\ v_{FC}(t).P_{FC_{m,t,s}}^{\min} \leq P_{FC_{m,t,s}}(t) \leq v_{FC}(t).P_{FC_{m,t,s}}^{\max} \end{aligned}$$

و برای واحدهای انرژی تجدیدپذیر در هر لحظه حداکثر توان قابل استحصال استفاده می گردد.

$$\begin{aligned} \forall m \in MG : \\ 0 \leq P_{WT_{m,t,s}}(t) \leq v_{WT}(t).P_{WT_{m,t,s}}^{\max} \quad (۱۰) \\ 0 \leq P_{PV_{m,t,s}}(t) \leq v_{PV}(t).P_{PV_{m,t,s}}^{\max} \end{aligned}$$

قیود مربوط به ولتاژ باسها، جریان و توان عبوری از فیدها از رابطه زیر حاصل می گردد.

$$\begin{aligned} \forall m \in MG : \\ V_b^{\min}{}_{m,t,s} \leq V_b(t) \leq V_b^{\max}{}_{m,t,s} \\ I_F^{\min}{}_{m,t} \leq I_F(t) \leq I_F^{\max}{}_{m,t} \quad (۱۱) \\ S_F^{\min}{}_{m,t} \leq S_F(t) \leq S_F^{\max}{}_{m,t,s} \end{aligned}$$

تابع هدف بهینه سازی برای یک شبکه توزیع هوشمند با MG عدد ریز شبکه به صورت زیر می باشد.

$$COST_{DNO} = \sum_{m=1}^{MG} \sum_{t=1}^T [U_m(t) \times Cost_{m,t,s} + U_{Net}(t) \times Cost_{Net,t,s}] \quad (12)$$

$$Cost_{m,t,s} = Cost_{Dsp_{m,t,s}} + Cost_{NDsp_{m,t,s}} \quad (13)$$

$$Cost_{Dsp_{m,t,s}} = \alpha P_{Dis_{m,t,s}}^2 + \beta P_{Dis_{m,t,s}} + \gamma \quad (14)$$

$$P_{Dis} \in (CHP, MT, FC)$$

و هزینه بهره برداری منابع غیر قابل کنترل از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$Cost_{NDsp_{m,t,s}} = aP_{Dis_{m,t,s}}^2 + bP_{Dis_{m,t,s}} + c \quad (14)$$

$$P_{NDis} \in (WT, PV)$$

در این مطالعه ضرایب a و b برای منابع غیرقابل کنترل در تمامی ریز شبکه ها صفر فرض شده است. با توجه به روابط فوق هزینه نهایی مشارکت ریز شبکه ها در برنامه ریزی شبکه های توزیع هوشمند به صورت (۱۵) خواهد بود.

$$COST_{DNO} = \sum_{m=1}^{MG} \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{N_s} [U_m(t) \times (Cost_{Dsp_{m,t,s}} + Cost_{NDsp_{m,t,s}}) + U_{Net,t}(t) \times Cost_{Net,t,s}] \quad (15)$$

$$COST_{DNO} = \sum_{m=1}^{MG} \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{N_s} [U_m(t) \times ((\sum_{k=1}^{N_{CHP,m}} Cost_{CHP_{m,t,s,k}} + \sum_{k=1}^{N_{MT,m}} Cost_{MT_{m,t,s,k}} + \sum_{k=1}^{N_{FC,m}} Cost_{FC_{m,t,s,k}}) + (\sum_{k=1}^{N_{WT,m}} Cost_{WT_{m,t,s,k}} + \sum_{k=1}^{N_{PV,m}} Cost_{PV_{m,t,s,k}})] + U_{Net,t}(t) \times Cost_{Net,t,s} \quad (16)$$

قیود محدودیت مجموع توان تولیدی برای هر ریز شبکه به صورت زیر خواهد بود:

$$\forall m \in MG : U_m(t) \cdot P_{m,t,s}^{\min} \leq P_m(t) \leq U_m(t) \cdot P_{m,t,s}^{\max} \quad (17)$$

$$\forall m \in MG : U_m(t) \cdot (\sum_{der=1}^{N_{DER}} P_{DER_{m,t,s}})^{\min} \leq P_m(t) \leq U_m(t) \cdot (\sum_{der=1}^{N_{DER}} P_{DER_{m,t,s}})^{\max} \quad (18)$$

قیود مربوط به رعایت حداقل زمان در مدار بودن MUT (متصل بودن به شبکه اصلی) و نیز حداقل زمان خارج از مدار بودن MDT (منفصل بودن از شبکه اصلی) برای هر ریز شبکه از روابط زیر بدست می آید.

$$\forall m \in MG : \begin{cases} (1-U_m(t+1)) \cdot MUT_m \leq Don_m(t) & \text{if } U_m(t) = 1 \\ U_m(t+1) \cdot MDT_m \leq Doff_m(t) & \text{if } U_m(t) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

که در عبارت های فوق Don_m مدت زمانی است که ریز شبکه m به صورت پیوسته در مدار بوده است. همچنین $Doff_m$ زمانی است که ریز شبکه m به صورت پیوسته خارج از مدار بوده است.

۳. الگوریتم بهینه سازی تولیدمثل غیرجنسی (ARO)

روش های گوناگونی برای بهینه سازی تابع هدف وجود دارد. الگوریتم ARO از روش بادینگ^۵ در تولیدمثل غیرجنسی الهام گرفته شده است. در ARO در نسخه اولیه، هر فرد با یک رشته دوتایی نشان داده می شود؛ این امر دقیقاً همانند بازنمایی باینری در الگوریتم های تکاملی است. یک بردار متغیر تصمیم X در مسأله بهینه سازی $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ که $X \in R^n$

^۵Budding

یک فرد در ARO نامیده می‌شود و هر متغیر تصمیم X_i به صورت یک کروموزوم در نظر گرفته می‌شود که از تعدادی بیت با نام ژن تشکیل شده است. یک کروموزوم با طول L در نظر گرفته می‌شود، در این کروموزوم، اولین بیت نشان دهنده علامت متغیر است. L_1 بیت اول، بخش صحیح متغیر تصمیم را نشان می‌دهند در حالیکه، L_2 بیت آخر نیز بخش اعشاری متغیر تصمیم را بیان می‌کنند. واضح است هرچه تعداد بیت‌های بخش اعشاری L_2 بزرگتر شود، دقت متغیر تصمیم نیز بیشتر خواهد شد. در نتیجه طول هر کروموزوم برابر است با: $l = l_1 + l_2 + 1$ و طول هر فرد با $n * L$ برابر خواهد بود [۲۲].

فرض بر آن است که هر جواب در فضای جستجو (S)، یک موجود زنده در محیط طبیعی خویش است و در واقع اگر ما فضای جستجو (S) را در نظر بگیریم، این فضا قابل مقایسه با محیطی است که یک موجود زنده در آن زندگی می‌کند و به رشد و متابولیسم تولیدمثل می‌پردازد. به طور مثال، فضای جستجو R^2 برای متغیر $X = (x_1, x_2)$ همانند محیطی است که در آن یک فرد (مثل یک کرم خاص که این نوع تولیدمثل را انجام می‌دهد) زندگی می‌کند. از طرفی منابع موجود در محیط محدود می‌باشند و تنها افرادی که بیشترین شایستگی را دارند، شانس بقا و ادامه حیات دارند. برای شروع، الگوریتم به طور تصادفی با یک فرد، در دامنه مشخص S آغاز می‌شود، آنگاه این فرد یک فرزند با اپراتور خاصی که مکانیزم بازتولید نامیده می‌شود، تولیدمثل می‌کند. والد و فرزندش مطابق یک شاخص عملکردی یا یک تابع برازش برای بقا رقابت می‌کنند. اگر فرزند که با نامیده می‌شود، رقابت را ببرد، والدش دور انداخته خواهد شد. بنابراین فرزند جایگزین والدش شده و خود، والد جدیدی خواهد شد. اگر والد پیروز می‌شد، آنگاه با دور انداخته می‌شد. الگوریتم مراحل تشریح شده را تکرار خواهد کرد تا معیار توقف برآورده شود. شبه‌کد^۶ الگوریتم، در زیر آورده می‌شود:

```
Pseudo code of ARO.

Begin

t = ۱;

P = Initialize (L,U); % Parent Initialization between lower
and upper bound

Fitness_P = fit(P); % Fitness of P is calculated

While stopping conditions are not met % Stopping Criteria

Bud(t) = Reproduce(P); % P reproduces a Bud

Fitness_Bud(t) = fit(Bud(t)); % Fitness of Bud(t) is
calculated

If Fitness_Bud(t) is better than Fitness_P

D = Bud(t); % Bud(t) is replaced with D
```

در واقع شبه کد فوق به عنوان الگوریتم ARO تابع هدف معادله ۱۶ را تحلیل خواهد کرد.

انتخاب یک اپراتور بازتولید مناسب، بسیار اساسی و مهم است. در ARO، عملگر تولیدمثل تنها عملگر تغییر است و این درحالی است که بیشتر الگوریتم‌های تکاملی از عملگرهای متعددی استفاده می‌کنند تا بتوانند جستجو در فضا و بهره‌برداری از اطلاعات موجود قبلی را براساس تئوری کنترل سنتی انجام دهند. در ARO، در هر کروموزوم، برای تولیدمثل یک زیررشته که

^۶Pseudo code

دارای g بیت است، یک ژن به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است g دارای توزیع یکنواخت در بازه $[1, L]$ است. L حداکثر تعداد بیت‌ها (ژن‌های) کروموزم است. سپس بیت‌های هر زیررشته جهش پیدا می‌کنند به گونه‌ای که در هر ژن انتخاب شده ۱ جایگزین ۰ و برعکس ۰ جایگزین ۱ می‌شود. در حقیقت، زیررشته که لارو نامیده می‌شود یک شکل جهش یافته از والد خود می‌باشد. لارو جستجو در فضا را به شکل مطلوبی انجام می‌دهد اما بهره‌گیری از اطلاعات نسل‌های قبلی را به خوبی انجام نمی‌دهد، در حالیکه، بر اساس تئوری بهینه‌سازی هر دوی اپراتورهای جستجو و بهره‌گیری الزامی است. به همین دلیل به منظور افزایش توان بهینه‌سازی الگوریتم، یک مکانیسم بهره‌گیری نیز، به آن افزوده می‌شود به گونه‌ای که لارو و والدش بتوانند اطلاعاتشان را احتمالاً با هم ترکیب نمایند؛ در نتیجه فرزند کاملاً مشابه با مدل زیستی‌اش تولید می‌شود، با این ابزار می‌توان اطمینان حاصل نمود که هر دو مکانیسم جستجو و بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در طی تقاطع عمل جهش نیز اتفاق می‌افتد.

۳.۱. گام‌های الگوریتم ARO

- ۱- بازنمایی: بازنمایی در الگوریتم ARO به صورت باینری صورت گرفته است.
- ۲- جواب اولیه: یک عدد صحیح در بازه مورد نظر به عنوان والد تولید می‌گردد.
- ۳- اندازه برازندگی این والد با استفاده از تابع هدف اندازه‌گیری می‌شود.
- ۴- والد با استفاده از عملگر بازتولید یک باد تولید می‌کند. به شرح زیر:



- ۵- قبل از برازندگی، موجه بودن باد آزمون می‌شود در صورتیکه موجه نباشد با یک مکانیسم تعمیر می‌گردد و سپس برازندگی باد، اندازه‌گیری می‌شود.
 - ۶- با مقایسه مقدار تابع هدف والد و باد، هر کدام که از برازندگی بهتری برخوردار باشند برای تولید نسل بعدی انتخاب می‌شوند.
- این روند تا رسیدن به شرایط توقف که تعداد تکرار است، ادامه می‌یابد.

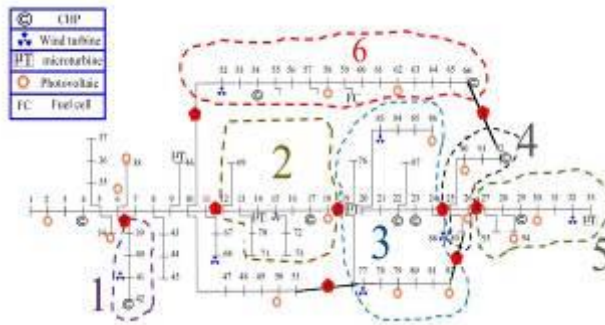
۴. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش ابتدا شبکه‌ی مورد مطالعه معرفی و بررسی و سپس نتایج شبیه‌سازی ارائه شده‌اند.

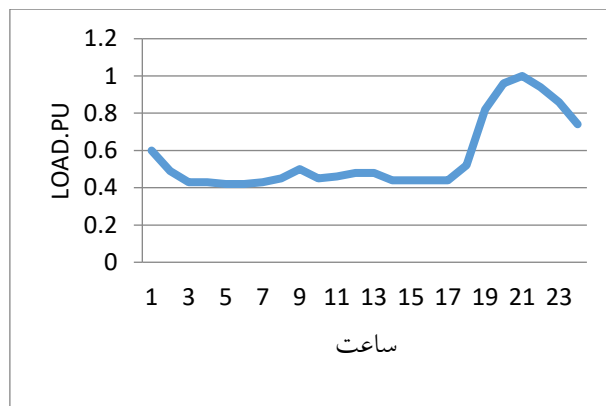
۴.۱. اطلاعات سیستم

شبکه‌ی مورد مطالعه در این مقاله، شبکه‌ی تغییر یافت توزیع شعاعی ۹۴ باسه کشور پرتغال می‌باشد که در شکل (۲) نشان داده شده است [۳۶]. این سیستم، بصورت ۶ ریزشبکه با کاربری‌های گوناگون خانگی، تجاری، صنعتی و دانشگاهی که در آن ریزشبکه‌های ۱، ۲ و ۵ کاربری خانگی، ریزشبکه ۳ کاربری تجاری، ریزشبکه ۴ دانشگاه و ریزشبکه ۶ با کاربری صنعتی فرض شده است. شکل‌های (۳) الی (۶) پروفیل بار مربوط به هر کاربری را در ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. ریزشبکه ۱ و ۵ با یک کلید، ریزشبکه ۲ و ۶ با دو کلید و ریزشبکه‌های ۳ و ۴ با چهار کلید به شبکه اصلی و سایر ریزشبکه‌ها متصل شده‌اند که مجموعاً ۹ کلید در کل شبکه فرض شده است. قیود امنیتی مربوط به مدت زمان اتصال و جدا شدن هر ریزشبکه از سایر ریزشبکه‌ها و شبکه اصلی مطابق جدول (۱) فرض شده است. در ریزشبکه‌ها ی فرض شده منابع تولید پراکنده‌ی مختلف تجدیدپذیر و

غیرتجدیدپذیر از قبیل CHP^y ، سلول های فتوولتائیک $(PV)^x$ ، توربین های بادی^۹، میکرو توربین^{۱۰} و پیل سوختی^{۱۱} طبق شکل (۲) وجود دارد.

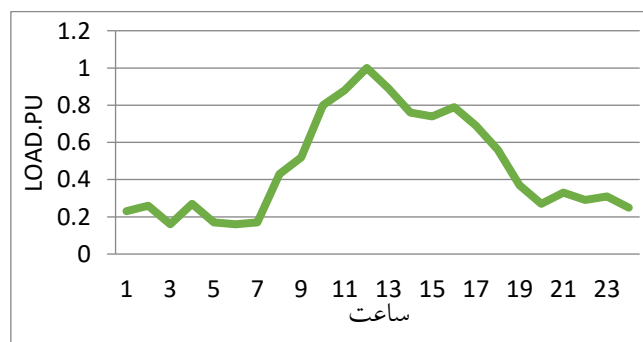


شکل (۲): شکل کلی سیستم ۹۴ باسه و ۶ ریز شبکه فرض شده همراه با منابع تولید پراکنده



شکل (۳): پروفیل بار در کاربری خانگی

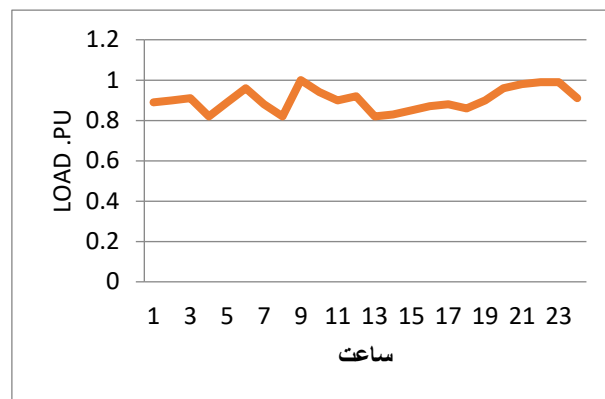
با توجه به نمودار ارائه شده در شکل (۳) بار خانگی در طول روز تقریباً ثابت و از ساعت ۱۶ رشد بار شروع در ساعت ۲۱ به بیشترین مقدار خود میرسد.



شکل (۴): پروفیل بار در ۲۴ ساعت در کاربری دانشگاه

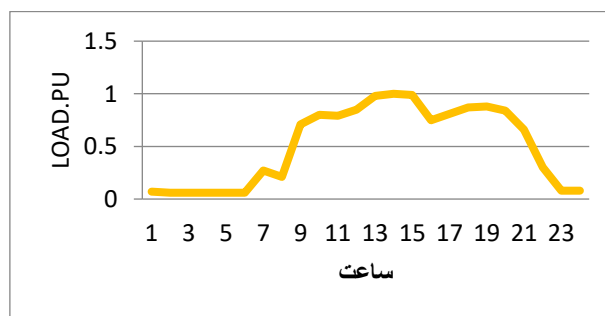
^y Combined Heat and Power
^x Photovoltaics
^z Wind Turbine
^ε Micro Turbine
[°] Fuel Cell

در کاربری دانشگاه رشد بار از ساعت ۷ شروع به رشد کرده در ساعت ۱۲ به بیشترین مقدار خود می رسد و سپس تا ساعت ۸ از مقدار آن کاهش می یابد.



شکل (۵): پروفیل بار در ۲۴ ساعت در کاربری صنعتی

در کاربری صنعتی پروفیل بار در نظر گرفته شده تقریباً به صورت ثابت و مقدار آن بیشتر است.



شکل (۶): پروفیل بار در ۲۴ ساعت در کاربری تجاری

جدول (۱): کمترین زمان متصل و منفصل بودن ریز شبکه‌ها به شبکه اصلی یا سایر ریز شبکه‌ها

شماره ریز شبکه	MUT(h)	MDT(h)
۱	۲	۳
۲	۵	۲
۳	۳	۱
۴	۱	۲
۵	۲	۴
۶	۳	۳

جدول (۱) کمترین زمان در شبکه بودن ریز شبکه و کمترین زمان جزیره بودن ریز شبکه را نشان می‌دهد. در این جدول منظور از MUT کمترین زمان متصل بودن یک ریز شبکه به شبکه اصلی یا ریز شبکه‌ها و منظور از MDT کمترین زمان منفصل بودن یک ریز شبکه از شبکه اصلی یا ریز شبکه‌های دیگر را نشان می‌دهد.

برای نمونه اگر ریز شبکه شماره ۱ به مدار وصل باشد باید حداقل به مدت ۲ ساعت در آن حالت باقی بماند و اگر به صورت جزیره ای فعالیت کند باید حداقل به مدت ۳ ساعت این وضعیت را حفظ کند سپس در صورت نیاز تغییر حالت دهد.

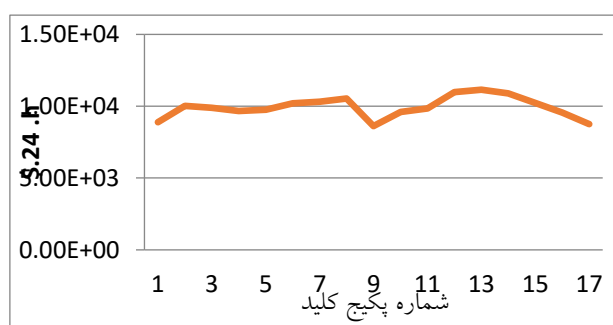
پس از ایجاد آرایش ریز شبکه ها باید آرایش کلید ها یا پکیج کلیدها در ۲۴ ساعت تولید گردد. پیچیدگی و دشواری این کار به این علت می باشد که کنترل برخی از ریز شبکه ها از طریق چند کلید صورت میگیرد به صورتی که برای جزیره کردن ریز شبکه باید تمامی کلید ها قطع گردند ولی برای به مدار آوردن تنها وصل بودن یک کلید کافی می باشد ، این کار نیز همچنین باید وضعیت ریز شبکه متناظر را از لحاظ قیود MUT و MDT در نظر داشت برای مثال اگر ریز شبکه متناظر در حالت جزیره ای باشد و قید MDT آن هنوز ارضا نشده باشد کلید مشترک بین دو ریز شبکه نمی تواند وصل شود. جدول (۲) نشان میدهد که هر ریز شبکه از طریق کدام کلید ها با شبکه اصلی و یا ریز شبکه های دیگر در ارتباط میباشد، یا میتوان گفت به مدار آوردن هر ریز شبکه به کدام کلید ها بستگی دارد. برای مثال ریز شبکه شماره ۱ تنها با کلید ۹ به ریز شبکه ها و شبکه اصلی متصل میشود ولی ریز شبکه شماره ۳ از طریق ۴ کلید به سایرین متصل می گردد.

جدول (۲): کلید های متناظر هر ریز شبکه

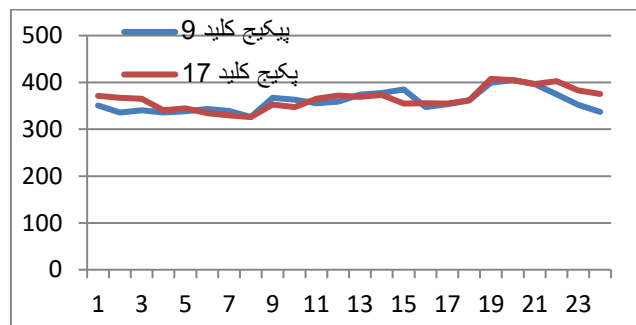
شماره ریز شبکه	شماره کلید								
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۲	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰
۴	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰
۵	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۶	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰

هدف این مقاله تعیین نحوه مشارکت ریز شبکه ها با توجه به قیود امنیتی می باشد. جدول (۱) قیود امنیتی و جدول (۲) کلید های متناظر هر ریز شبکه را نشان می دهد. با قرار گرفتن قیود امنیتی مذکور و سایر اطلاعات اشاره شده در برنامه، پکیج کلید ها در ۲۴ ساعت حاصل میشود. اطلاعات پکیج کلید بدست آمده در برنامه پخش بار در ۲۰ سناریو مختلف قرار میگیرد در صورت رعایت قیود فنی شبکه، نتیجه حاصل می شود و آن پکیج کلید تایید میگردد در صورت عدم رعایت قیود فنی، برنامه همگرا نمی شود و پکیج حاصله مردود اعلام می گردد. حال با توجه به هدف مربوطه که میتواند کمترین هزینه بهره برداری، کمترین تلفات، ولتاژ ایده آل، بیشترین استفاده از منابع تجدید پذیر و ... باشد یکی از پکیج های بدست آمده انتخاب می گردد.

در این بخش هدف کمترین هزینه بهره برداری کل شبکه در ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است، شکل (۷) نشان میدهد کمترین هزینه بهره برداری به پکیج کلید شماره ۹ با مقدار ۸۶۱۶ \$ می باشد. همچنین هزینه بهره برداری کل شبکه با پکیج کلید شماره ۱۷ نیز ارایه شده است. شکل (۸) مقدار هزینه بهره برداری با دو پکیج نامبرده را در ۲۴ ساعت تحت یک سناریوی مشترک (۱۳) مقایسه می کند.



شکل (۷): کمترین هزینه بهره برداری



شکل (۸): مقایسه هزینه بهره برداری کل شبکه با دو پکیج مختلف



شکل (۹): مقایسه هزینه بهره برداری از کل شبکه در ۲۴ ساعت

شکل (۹) هزینه کل بهره برداری با دو پکیج ۹ و ۱۷، ۱۳۹ دلار می باشد. بنابراین انتخاب پکیج کلید ۹ با توجه به هدف ما که کمترین هزینه بهره برداری می باشد بهتر است. در این حالت آرایش ریزش شبکه ها به صورت جدول (۳) می باشد و پکیج کلید ۲۴ ساعته برای آن آرایش حاصل شده که اطلاعات آن در جدول (۴) ارایه شده است. همچنین جدول (۵) و (۶) اطلاعات پکیج کلید ۱۷ و آرایش ریزش شبکه ها را در آن حالت نیز نشان میدهد.

جدول (۳): حالت بدست آمده ریزش شبکه ها در پکیج کلید شماره ۹

ساعت	شماره ریزش شبکه					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۳	۰	۱	۱	۱	۰	۱
۴	۰	۱	۱	۱	۰	۱
۵	۰	۱	۱	۱	۰	۱
۶	۰	۰	۱	۱	۰	۱
۷	۰	۰	۱	۱	۱	۱
۸	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۹	۰	۱	۱	۰	۱	۱
۱۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱
۱۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱
۱۲	۱	۱	۱	۱	۰	۱
۱۳	۱	۱	۱	۱	۰	۰

۱۴	۱	۱	۱	۰	۰	۰
۱۵	۱	۱	۱	۰	۰	۰
۱۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۷	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۱۸	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۱۹	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۲۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول (۴): پکیج کلید شماره ۹

ساعت	کلید ۱	کلید ۲	کلید ۳	کلید ۴	کلید ۵	کلید ۶	کلید ۷	کلید ۸	کلید ۹
۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱
۲	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۳	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰
۴	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰
۵	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰
۶	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰
۷	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۹	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰
۱۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰
۱۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰
۱۲	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۱۳	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱
۱۴	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱
۱۵	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱
۱۶	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱
۱۷	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۱۸	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰
۱۹	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰
۲۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۲	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱
۲۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۴	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱

جدول (۵): حالت بدست آمده ریزشکته ها در پکیج کلید شماره ۱۷

ساعت	ریزشکته ۱	ریزشکته ۲	ریزشکته ۳	ریزشکته ۴	ریزشکته ۵	ریزشکته ۶
۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰
۲	۱	۱	۱	۱	۰	۰
۳	۱	۱	۱	۱	۰	۰
۴	۱	۱	۰	۱	۰	۱
۵	۰	۱	۰	۱	۰	۱
۶	۰	۱	۱	۱	۰	۱
۷	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۱۲	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۱۳	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۱۴	۱	۱	۱	۱	۱	۰

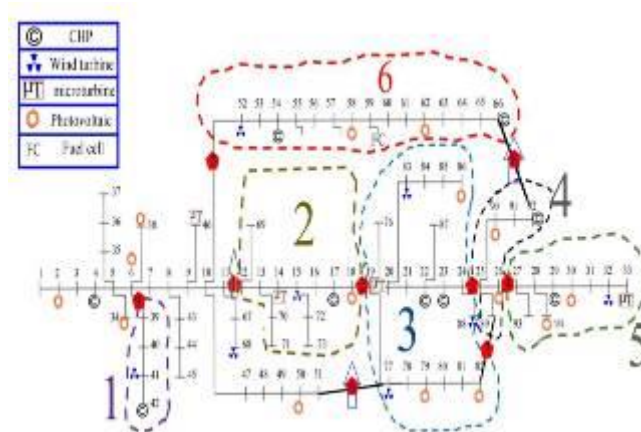
۱۵	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۶	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۷	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۸	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰
۲۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰
۲۴	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰

جدول (۶): پکیج کلید شماره ۱۷

س اع ت	کلید ۱	کلید ۲	کلید ۳	کلید ۴	کلید ۵	کلید ۶	کلید ۷	کلید ۸	کلید ۹
۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱
۲	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱
۳	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱
۴	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱
۵	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰
۶	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰
۷	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰
۸	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱
۹	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱
۱۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱
۱۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱
۱۲	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱
۱۳	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱
۱۴	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱
۱۵	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۱۶	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰
۱۷	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰
۱۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰
۱۹	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱
۲۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۲	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱
۲۳	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱
۲۴	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰

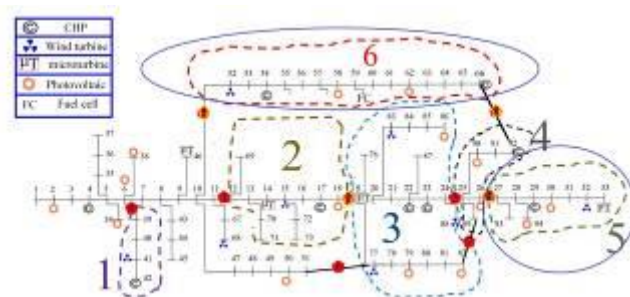
همان گونه که اشاره شد جدول (۳) حالت بدست آمده ریزش شبکه ها در کمترین هزینه بهره برداری در ۲۴ ساعت را نشان میدهد. مطابق جدول متصل بودن یا منفصل بودن تمامی ریز شبکه ها به سایر ریزش شبکه های و یا شبکه ی اصلی ارایه شده است که با مقایسه آن با جدول (۱) میتوان نتیجه گرفت که آرایش بدست آمده تمامی قیود امنیتی هر ریز شبکه را رعایت نموده است. برای مثال با توجه جدول (۱) ، ریزش شبکه ۱ دارای قید $MUT=3$ و $MDT=2$ می باشد بنابراین اگر میکروگرید ۱ در مدار باشد باید حداقل ۲ ساعت و اگر بصورت جزیره ای باشد باید حداقل ۳ ساعت نیز در آن باقی بماند که با مقایسه این با وضعیت میکروگرید در ۲۴ ساعت (جدول (۳)) مشاهده میشود که میکروگرید ۱ ابتدا از ساعت ۱ الی ۲ به شبکه متصل بوده است سپس از ساعت ۳ الی ۱۱ بصورت جزیره ای به کار خود ادامه داده و از ساعت ۱۲ تا ۱۶ به شبکه متصل و سپس ۳ ساعت به صورت جزیره ای در آمده و پس از آن دوباره به شبکه وصل میگردد این نتیجه با قیود امنیتی کاملا منطبق میباشد، با مقایسه نتایج حاصله با وضعیت کلید ها با توجه به اینکه ریز شبکه شماره ۱ تنها با یک کلید (کلید شماره ۹) به شبکه وصل می شود این نتیجه حاصل می شود که وضعیت کلید شماره ۹ در ۲۴ ساعت تمامی قیود را رعایت نموده است و مقایسه وضعیت سایر کلید ها نیز نشان میدهد پکیج کلید به دست آمده کاملا صحیح می باشد.

با اعمال پکیج وضعیت کلید ها در برنامه شبیه سازی، ساختار شبکه در زمان های مختلف با توجه به قیود تغییر می یابد که نتیجه را برای برخی از ساعت ها در شکل های (۴)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) نشان داده ایم. همچنین برای تایید پکیج بدست آمده برخی از قیود فنی شبکه را در ساعت ها و شرایط مختلف بررسی نموده ایم.



شکل (۱۰): شکل شبکه مورد مطالعه در ساعت ۱

با توجه به جدول (۳) و (۴) در ساعت ۱ کلید های ۱، ۶، ۸ قطع می باشند و لی هیچ ریز شبکه ای به صورت جزیره ای فعالیت نمیکنند که شکل (۸) تایید کننده این موضوع می باشد.



شکل (۱۱): شبکه مورد مطالعه در ساعت ۱۳

در ساعت ۱۳ کلید های ۲، ۴، ۵، ۶ و ۸ قطع می باشند ولی تنها ریز شبکه های ۵ و ۶ به صورت جزیره ای فعالیت میکنند که شکل (۱۱) بیانگر این موضوع می باشد.



شکل (۱۲): شبکه مورد مطالعه در ساعت ۱۵

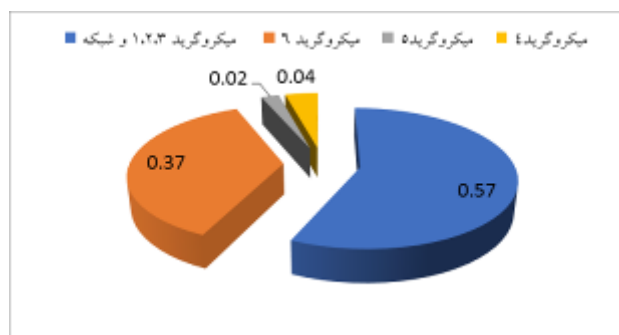
شکل (۱۲) وضعیت تغییر یافته ریز شبکه چندگانه مورد مطالعه در ساعت ۱۵ را نشان میدهد با توجه به جدول (۳) در ساعت ۱۵، کلید های ۳، ۴، ۵، ۷ و ۸ قطع و بقیه کلید ها وصل میباشند این وضعیت نشان میدهد که میکروگرید های ۴، ۵ و

۶ به صورت جزیره ای می باشند. با توجه اینکه نتایج حاصله از وضعیت کلیدها و ریز شبکه ها کاملا مطابق قیود میباشد، صحت سایر قیود فنی را نیز به علت زیاد بودن سناریو ها و ساعت ها فقط بر روی و برخی از سناریو ها که احتمال وقوع آن بیشتر از بقیه سناریو ها میباشد بررسی میکنیم.

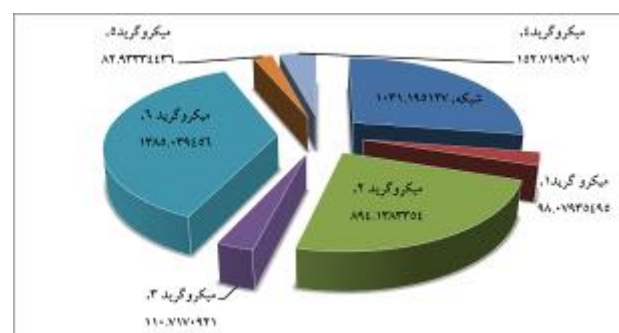


شکل (۱۳): توان تولیدی، توان مصرفی و تلفات در ساعت ۱۵ سناریوی ۲

یکی از مهمترین قید ها در به مدار آوردن ریز شبکه ها برابری تولید با مجموع مصرف و تلفات می باشد، با توجه شکل (۱۳) توان تولیدی در کل ریز شبکه ها در ساعت ۱۵، ۳۷۵۴ کیلو وات می باشد که برابر با مجموع مقدار کل توان مصرفی (۳۷۲۳,۸۸ کیلووات) و تلفات کل (۳۰,۹۹ کیلو وات) میباشد.



شکل (۱۴): میزان مشارکت در تولید در ساعت ۱۵ به تفکیک ریز شبکه های جزیره شده و متصل به هم



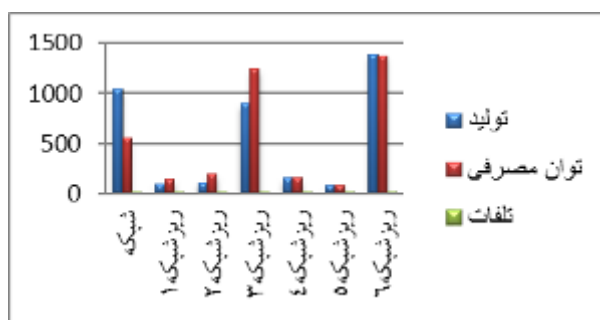
شکل (۱۵): مشارکت ریز شبکه ها در تولید در ساعت ۱۳

با توجه به شکل (۱۴) که نشان دهنده ساختار شبکه در ساعت ۱۳ است، شبکه به چهار قسمت تقسیم شده است. شکل (۱۴) نشان دهنده توان تولیدی در ۳ ریز شبکه ی جزیره شده و بقیه شبکه را نشان میدهد. و شکل (۱۵) میزان توان تولیدی را به تفکیک هر ریز شبکه نمایش میدهد. که بیشترین توان تولیدی به مقدار ۱۳۸۵،۰۳ کیلو وات به ریز شبکه شماره ۶ که کاربری صنعتی دارد مربوط است.

علاوه بر رعایت قید برابری توان تولیدی و با مجموع توان مصرفی و تلفات در کل شبکه این قید باید برای تمامی ریز شبکه ها که به صورت جزیره ای فعالیت میکنند نیز باید رعایت شود که طبق نمودار ارایه شده در شکل (۱۶) برای ریز شبکه های ۴، ۵، ۶ صادق می باشد، از آنجا که ریز شبکه های ۱، ۲ و ۳ به شبکه وصل میباشند این قید برای مجموع آنها برابر است. شکل (۱۷) جزئیات میزان توان تولیدی و مصرفی در ریز شبکه های ۱، ۲، ۳ و شبکه اصلی را نشان داده است.



شکل (۱۶): میزان توان تولیدی، توان مصرفی و تلفات در ساعت ۱۵ سناریوی ۲



شکل (۱۷): میزان توان تولیدی، توان مصرفی و تلفات به تفکیک ریز شبکه ها در ساعت ۱۵

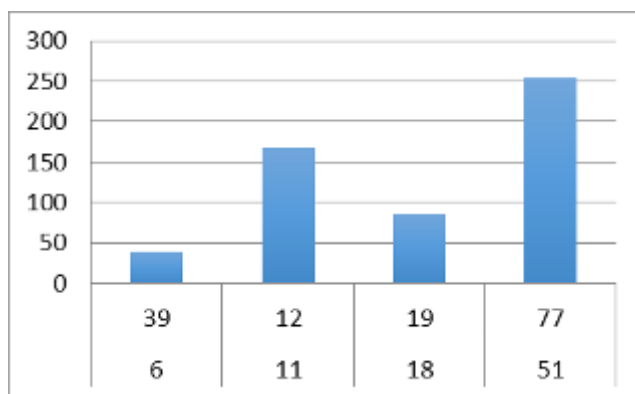
شکل (۱۸) توان عبوری از فیدر های مرزی ریز شبکه های ۱، ۲، ۳ و شبکه اصلی در ساعت ۱۳ را نشان می دهد. فیدر ۶-۳۹ مرز بین شبکه و ریز شبکه ۱، فیدر ۱۱-۱۲ مرز ریز شبکه ۲ و شبکه، فیدر ۱۹-۱۸ مرز بین ریز شبکه ۲ و ریز شبکه ۳، فیدر ۷۷-۵۱ مرز ریز شبکه ۳ و شبکه اصلی می باشد. با توجه به نمودار شکل (۱۷) توان تولیدی ریز شبکه های ۱، ۲ و ۳ کمتر از توان مصرفی آن ها می باشد بنابر این برای تعادل توانی نیاز به واردات توان از شبکه اصلی می باشد.

جدول (۷): میزان توان تولیدی، مصرفی و تلفات در ساعت ۱۵

	توان تولیدی	توان مصرفی	تلفات	توان اضافی
شبکه	۵۵۱،۳۱	۱۰۳۱،۱۹	۸،۹۹	۴۷۰،۹۸
ریز شبکه ۱	۱۳۷،۶۹	۹۸،۰۷	۰،۹۹	-۴۰،۶۱
ریز شبکه ۲	۱۹۲،۵۱	۱۱۰،۷۱	۵،۴۱	-۸۷،۱۹
ریز شبکه ۳	۱۲۳۵،۳۵	۸۹۴،۱۳	۱،۹۲	-
				۳۴۳،۱۲

ریزشبکه ۴	۱۵۲,۴۴	۱۵۲,۷۱	۰,۲۷	۰
ریزشبکه ۵	۸۲,۸۷	۸۲,۹۳	۰,۰۵۸	۰
ریزشبکه ۶	۱۳۷۱,۶۸	۱۳۸۵,۰۳	۱۳,۳	۰

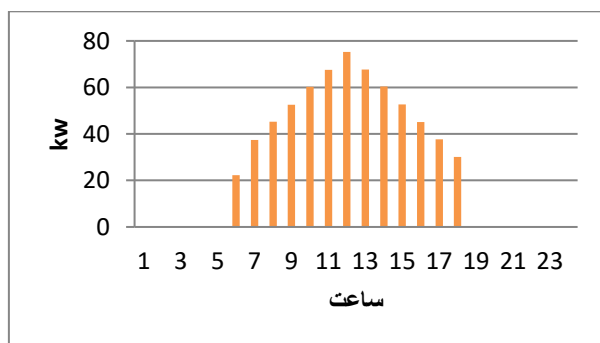
با توجه به داده های جدول (۷) شبکه اصلی ۴۷۰ کیلووات نیاز ۳ ریز شبکه ۱،۲ و ۳ را تامین میکند و این توان ها از طریق فیدر های مرزی انتقال داده میشوند. طبق جدول ریز شبکه ۱ به مقدار ۶۱/۴۰ کیلووات نیاز دارد این توان از طریق تنها فیدر آن (فیدر ۶-۳۹) به آن میرسد. شکل (۱۸) صحت این نتیجه را نشان می دهد.



شکل (۱۸): توان عبوری از فیدر های مرزی ریز شبکه های ۱،۲،۳ و شبکه اصلی در ساعت ۱۵

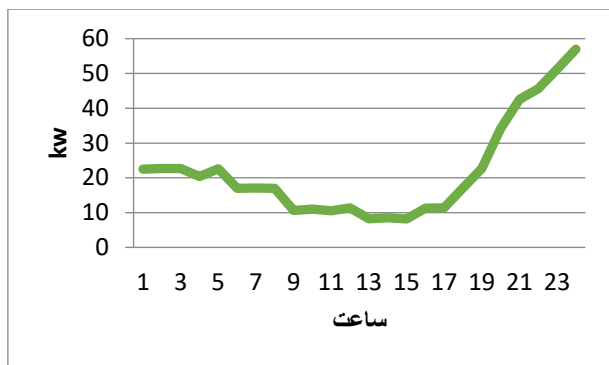
برای سایر فیدر ها نیز این نتیجه صادق بود، این نشان میدهد نتایج بدست آمده از برنامه کاملا صحیح می باشد.

باتوجه به تعداد زیاد منابع تولید پراکنده و تعداد ریز شبکه ها به بررسی برخی از آنها می پردازیم شکل (۱۹) توان تولیدی منابع خورشیدی میکروگرید ۲ را در ۲۴ ساعت نمایش می دهد. با توجه مطابق شکل تولید توان طبق سناریو از ساعت ۶ با طلوع آفتاب شروع و تا غروب آفتاب ساعت ۱۸ ادامه می یابد.



شکل (۱۹): توان تولید توسط منابع خورشیدی میکروگرید ۲ در ۲۴ ساعت

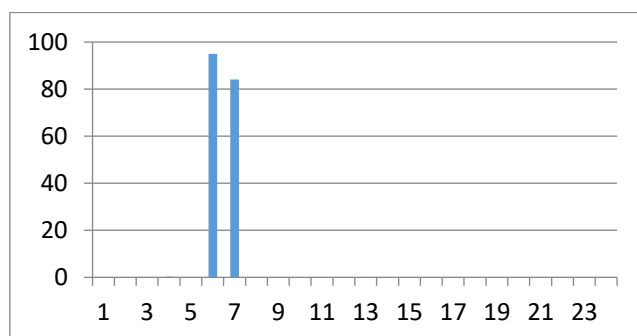
شکل (۲۰) توان تولیدی توسط توربین های بادی ریز شبکه ۲ را در ۲۴ ساعت نشان میدهد وزش باد طبق ۲۰ سناریو مختلف انجام گرفته است که نتایج سناریوی ۲ در شکل آورده شده است. این منبع در باس شماره ۱۵ ریز شبکه شماره ۲ می باشد. شکل (۲۱) توان تولیدی توسط میکروتوربین واقع در باس ۱۴ ریز شبکه ۲ را ۲۴ ساعت نشان می دهد.



شکل (۲۰): تولید توان توسط توربین های بادی میکروگرید ۲ در ۲۴ ساعت



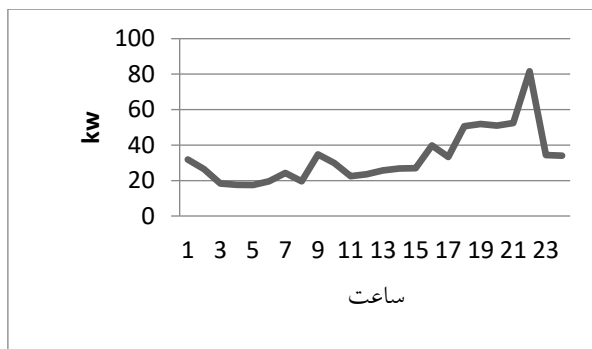
شکل (۲۱): توان تولیدی توسط میکروتوربین میکروگرید ۲ در ۲۴ ساعت



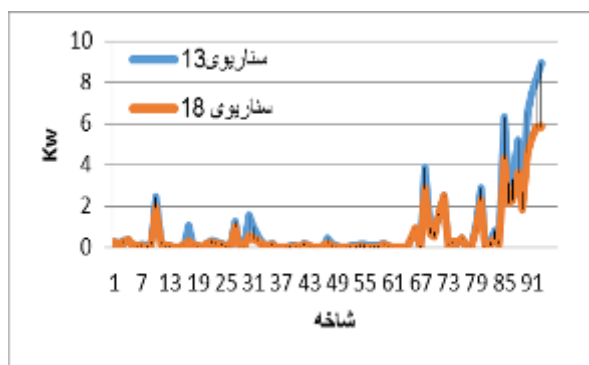
شکل (۲۲): توان تولیدی توسط منبع CHP در ریز شبکه شماره ۲ در ۲۴ ساعت

با توجه جدول (۳) ریز شبکه شماره ۲ تنها در ساعتهای ۶ و ۷ به صورت جزیره ای میباید بنابراین با توجه به اینکه منبع CHP موجود در این ریز شبکه نسبت به منابع دیگر هزینه بهره برداری بیشتری دارد این ریز شبکه فقط در مواقع ضروری از این منبع استفاده میکند و در بقیه موارد توان مورد نیاز خود را از سایر ریز شبکه ها تامین میکند. طبق شکل (۲۲) تولید توان در منبع CHP به طور عمده در ۶ و ۷ میباید، مجموع توان تولیدی از این منبع در ۲۴ ساعت ۱۸۱ کیلو وات میباید. شکل (۲۳) مجموع تلفات کل شبکه در ۲۴ را نشان می دهد طبق شکل بیشترین مجموع تلفات مربوط به ساعت ۲۲ می باشد که مقدار آن ۸۱،۶۱ کیلو وات است. در این حالت طبق جدول (۳) و (۴) هیچ ریز شبکه ای به صورت جزیره نمی باشد ولی شبکه به دو قسمت تقسیم شده است که ریز شبکه های ۳، ۴، ۵ و ۶ در یک طرف و بقیه ریز شبکه ها در طرف دیگر با هم در ارتباط می باشند.

شکل (۲۴) نیز تلفات تمامی باس ها را در ساعت ۲۲ در دو سناریوی ۱۳ و سناریوی ۱۸ با هم مقایسه می کند. طبق شکل میزان تلفات در سناریوی ۱۸ کمتر از میزان تلفات در سناریوی ۱۳ در ساعت ۲۲ می باشد.

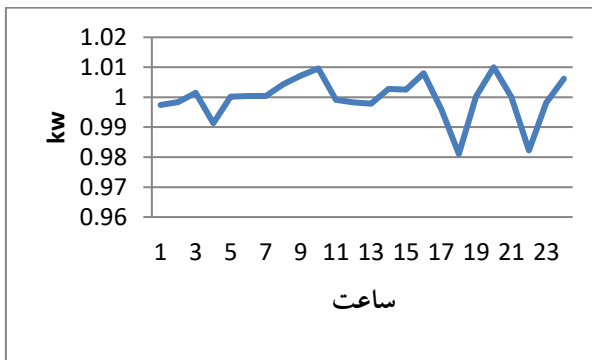


شکل (۲۳): تلفات کل شبکه در ۲۴ ساعت در سناریو ۱۳



شکل (۲۴): تلفات در ساعت ۲۲ به تفکیک شاخه ها

شکل (۲۵) پروفیل ولتاژ باس ۷۴ میکروگرید شماره ۲ را نشان میدهد. این میکروگرید فقط در ساعت ۶ و ۷ بصورت جزیره ای می باشد و در بقیه ساعت ها به صورت متصل به شبکه فعالیت میکند، ولتاژ این باس که در انتهای فیدر قرار دارد، در کمترین حالت به مقدار $0.985 pu$ و در بیشترین حالت به میزان $1.005 pu$ میرسد که این مقادیر نیز طبق قیود فنی می باشند.



شکل (۲۵): پروفیل ولتاژ باس ۷۴ در ۲۴ ساعت در سناریو ۱

نتایج حاصل شده در این بخش به صورت برنامه ریزی ۲۴ ساعته ارائه شده است. با توجه اشکال و جداول خروجی، نتایج حاصل نشان می دهد که توان های تولیدی در ریزشبهه ها با توان مصرفی و تلفات هماهنگ می باشند یعنی توان تولید شده برابر با مجموع مصرف و تلفات می باشد و قیود اشاره شده در فصل قبل ارضا شده است. نتایج حاصله نشان می دهد با کوچکتر و مورد بهره برداری قرار گرفتن ریزشبهه ها به صورت جزیره، ولتاژ باس ها به مقدار یک پریونیت نزدیک می شود. نتایج این تحقیق نشان می دهد که امکان مدار آوردن ریز شبکه ها با در نظر گرفتن قیود امنیت وجود دارد.

۴.۲. مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی با دیگر الگوریتم‌ها

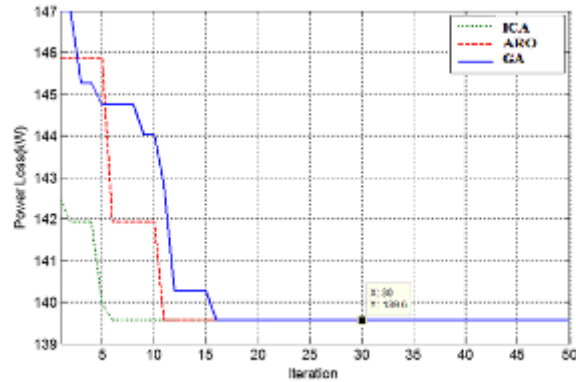
برای سنجش الگوریتم‌های ژنتیک [۲۳]، ICA [۲۴] و الگوریتم ARO ارائه شده، نتایج آن‌ها برای بهینه‌سازی یک شبکه ۳۳ با سه ذکر شده در حالات حضور و عدم حضور تولیدات پراکنده مورد مقایسه قرار می‌گیرد. برای این منظور، در هر حالت، هر یک از الگوریتم‌ها ده بار ران گردیده و هربار مقدار تلفات توان محاسبه شده است. سپس مقادیر متوسط، انحراف معیار، بهترین و بدترین پاسخ برای آن‌ها بدست آمده است.

در جدول زیر، نتایج هر سه الگوریتم برای بهبود تلفات توان شبکه ۳۳ با سه، در حالت عدم حضور تولیدات پراکنده آورده شده است.

جدول ۸: مقایسه نتایج الگوریتم‌های مختلف برای بهبود تلفات توان در شبکه ۳۳ با سه بدون حضور تولیدات پراکنده

	Genetic	ICA	ARO
۱۰ trial	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۴۳,۹۳۳۹
	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۴۶,۲۹۵۲	۱۳۹,۵۵۴۲
	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۴۶,۲۹۵۲	۱۳۹,۵۵۴۲
	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۴۳,۹۳۳۹	۱۳۹,۵۵۴۲
	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲
	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲
	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۴۳,۹۳۳۹
	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲
	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲
	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲
Average	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۴۱,۳۴۰۴	۱۴۰,۴۳۰۱
STDEV	۰	۲,۹۴۶۹۳۶	۱,۸۴۶۶۲۱
Min	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۳۹,۵۵۴۲
Max	۱۳۹,۵۵۴۲	۱۴۶,۲۹۵۲	۱۴۳,۹۳۳۹

در حالت عدم حضور تولیدات پراکنده، شبکه ۳۳ با سه پنج متغیر تصادفی باینری مربوط به پنج سوئیچ باز شده خواهد داشت. مقادیر جدول بالا نشان می‌دهد، که هر سه الگوریتم قابلیت پیدا نمودن بهترین پاسخ را داشته‌اند. اما ضعیف‌ترین نتایج مربوط به الگوریتم ICA است. یکی از ایرادات اصلی الگوریتم ICA همگرایی پیش از موعد آنست که موجب می‌شود در بسیاری از اوقات پاسخ بهینه بدست نیاید. همانگونه که مشاهده می‌شود، الگوریتم بهبود یافته (ARO ارائه شده) نسبت به الگوریتم ICA نتایج بهتری داشته، و دارای انحراف معیار و مقدار میانگین مناسب‌تری است. الگوریتم ژنتیک نیز در هر ۱۰ تلاش، بهترین پاسخ را یافته و در نتیجه انحراف معیار آن صفر گردیده است. در شکل زیر نحوه همگرایی هر سه الگوریتم برای حالات ذکر شده در بالا ترسیم گردیده است.



شکل ۲۶: بهبود تلفات توان شبکه ۳۳ با سه بدون حضور تولیدات پراکنده برحسب تعداد تکرار در الگوریتم‌های مختلف

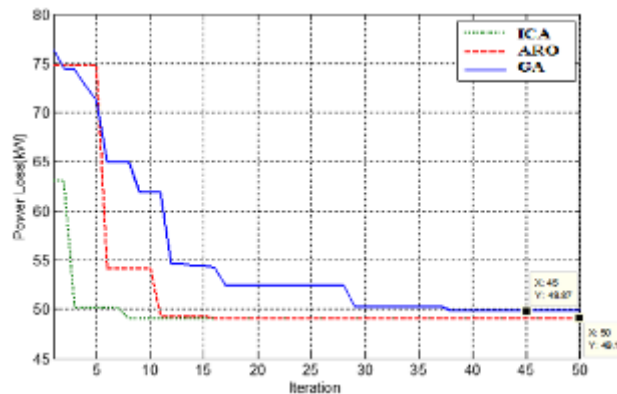
همانگونه که در هر دو شکل بالا مشاهده می‌شود، الگوریتم ICA در همان تکرارهای اولیه همگرا شده است. اما الگوریتم ARO با تقسیم فضای مسئله و جمعیت تولید شده، تعداد تکرار بیشتری را برای پیدا نمودن پاسخ مناسب صرف نموده، و در عوض نتیجه بهتری بدست آورده است.

حال عملکرد این سه الگوریتم را در حالت حضور تولیدات پراکنده مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. نتایج مربوطه برای شبکه ۳۳ با سه در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۹: مقایسه نتایج الگوریتم‌های مختلف برای بهبود تلفات توان در شبکه ۳۳ با سه با حضور تولیدات پراکنده

	Genetic	ICA	ARO
۱۰ trial	۵۰,۱۵۱۰۲	۴۹,۱۴۶۹۹	۴۹,۱۰۱۱۳
	۵۰,۲۸۰۱۲	۵۳,۷۶۶۳۷	۴۹,۳۹۳۴
	۴۹,۸۷۰۵۵	۵۰,۵۸۰۶۹	۵۱,۰۲۰۷
	۵۳,۱۱۸۳	۵۱,۳۵۶۳۲	۴۹,۱۰۱۱۳
	۵۰,۹۳۷۰۱	۵۰,۲۳۲۱۸	۴۹,۱۰۱۱۳
	۵۰,۳۲۱۲۸	۴۹,۴۱۱۳۹	۴۹,۵۴۴۳۳
	۵۱,۵۹۵۲۲	۴۹,۱۰۱۱۳	۴۹,۱۰۱۱۳
	۵۲,۰۳۶۳۷	۵۰,۱۴۵۵	۴۹,۱۰۱۱۳
	۵۳,۵۹۳۱	۴۹,۱۲۴۴	۵۱,۱۶۵۰۷
	۵۲,۵۵۶۲۹	۵۱,۱۶۵۰۷	۴۹,۴۲۴۶
Average	۵۱,۴۴۵۹۲	۵۰,۴۰۳	۴۹,۶۰۵۳۷
STDEV	۱,۳۳۵۵۲	۱,۴۴۶۰۴۷	۰,۸۰۱۹۷۶
Min	۴۹,۸۷۰۵۵	۴۹,۱۰۱۱۳	۴۹,۱۰۱۱۳
Max	۵۳,۵۹۳۱	۵۳,۷۶۶۳۷	۵۱,۱۶۵۰۷

در حالت حضور تولیدات پراکنده، در شبکه ۳۳ با سه، علاوه بر ۵ متغیر تصادفی باینری مربوط به خطوط، ۸ متغیر تصادفی پیوسته مربوط به اندازه تولیدات پراکنده و ضریب توان آن‌ها به فضای جستجوی مسئله اضافه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در این حالت ضعف الگوریتم ژنتیک نسبت به دو الگوریتم دیگر نمایان شده است. الگوریتم ICA در مسائل پیوسته عموماً نتایج مناسب‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک خواهد داشت. اما این الگوریتم همچنان ایراد مربوط به همگرایی پیش از موعد خود را به همراه دارد. نتایج جدول بالا نشان می‌دهد که بهترین نتایج مربوط به الگوریتم ARO ارائه شده می‌باشد. کمترین انحراف معیار، مقدار متوسط، و مقدار ماکزیمم توسط الگوریتم ARO بدست آمده است. نحوه همگرایی این سه الگوریتم در حالت حضور تولیدات پراکنده نیز در شکل‌های زیر ترسیم شده است.

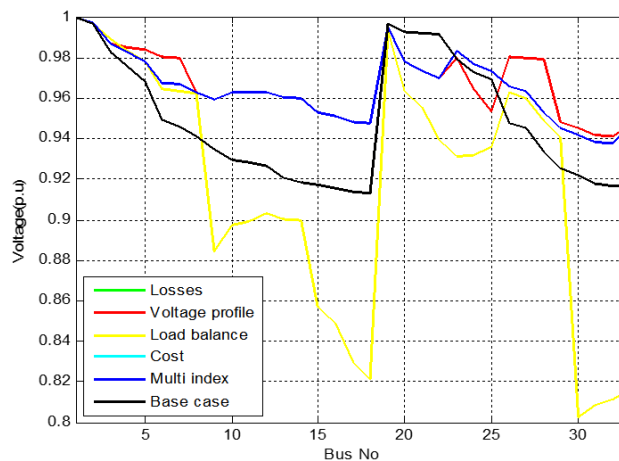


شکل ۲۷: بهبود تلفات توان شبکه ۳۳ باسه با حضور تولیدات پراکنده برحسب تعداد تکرار در الگوریتم‌های مختلف

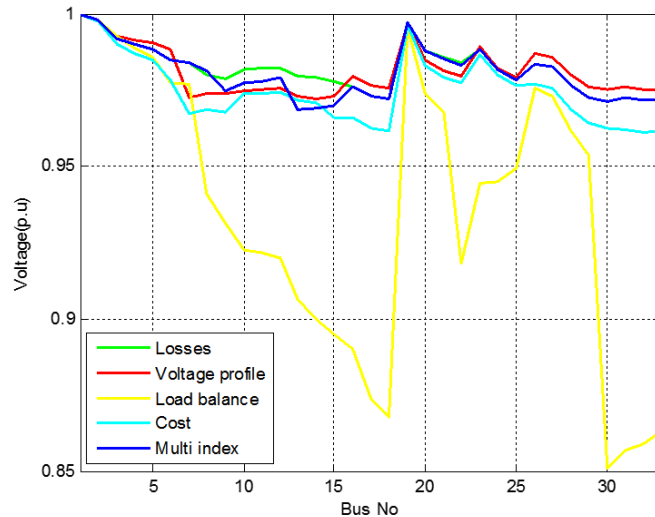
شکل بالا نشان دهنده‌ی همگرایی پیش از موعد الگوریتم ICA، و نیز سرعت و قابلیت پایین الگوریتم ژنتیک می‌باشد. الگوریتم ARO ارائه شده، در تکرارهای ابتدایی نتایج ضعیف‌تری داشته، اما جستجوی بهتری در فضای حل مسئله انجام داده، و در ادامه به پاسخ مطلوب همگرا شده است. با در نظر گرفتن مباحث مطرح شده، بطور کلی می‌توان گفت:

- الگوریتم ژنتیک در مسائل باینری توانایی مناسبی از خود نشان می‌دهد، در نتیجه در حالت عدم حضور تولیدات پراکنده، پاسخ‌های بسیار مطلوبی بدست آورده است.
- الگوریتم ICA بدلیل همگرایی پیش از موعد خود، در بسیاری از حالات پاسخ مطلوب را بدست نخواهد آورد.
- الگوریتم ARO ارائه شده، با تقسیم فضای جستجو قابلیت سرچ بهتری پیدا نموده، و در تمامی حالات ذکر شده پاسخ‌های نسبتاً مطلوبی را بدست آورده است.

در ادامه پروفیل ولتاژ برای حالات گوناگون بهینه‌سازی ARO، ترسیم گردیده است. این شکل‌ها برای شبکه ۳۳ باسه و درحالات عدم حضور و حضور تولیدات پراکنده ترسیم شده است.



شکل ۲۸: پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ باسه درحالات عدم حضور تولیدات پراکنده



شکل ۲۹: پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ باسه در حالت حضور تولیدات پراکنده

همانگونه که مشاهده می‌شود، وضعیت پروفیل ولتاژ شبکه در حالات بهینه نسبت به حالات مبنا بهبود محسوسی یافته است. در حالت حضور تولیدات پراکنده نیز نسبت به عدم حضور این تولیدات بهبود وضعیت ولتاژ مشاهده می‌گردد. بطور کلی می‌توان گفت بهترین وضعیت ولتاژ در حالت بهینه‌سازی پروفیل ولتاژ (منحنی قرمز رنگ) بدست آمده است.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله علاوه بر برنامه ریزی در کل شبکه ی توزیع فرض شده و تمام ریز شبکه ها، مساله ی بهینه سازی بهره برداری در داخل هر ریز شبکه با در نظر گرفتن پارامتر های عدم قطعیت مورد بررسی قرار گرفته شده است. به طور کلی دستاوردهای این مقاله به شرح زیر می باشد:

- ۱- تولید الگوی به مدار آوردن بهینه ریز شبکه ها و متناظر با آن تعیین حالات کلیدهای متصل
- ۲- انجام پخش بار بهینه تولید مثل غیرجنسی برای تمامی حالات، سناریوها و شرایط بهره برداری مختلف
- ۳- ایجاد سناریو و انجام مطالعات فوق بر اساس سناریو برای هر ساعت
- ۴- ایجاد الگوی به مدار آوردن ریز شبکه در طول ۲۴ ساعت
- ۵- مطالعه مقایسه ای خروجی های پخش بار بهینه با حالت پایه
- ۶- امکان تعریف ورودی متناظر، شرایط عادی و بحرانی از قبیل شرایط خاص تاب آوری ریز شبکه و تامین قیود مربوطه از قبیل حالات کلیدهای بین ریز شبکه ها
- ۷- برتری همگرایی الگوریتم ARO پی شنهادی در مقابل دیگر الگوریتم های بهینه سازی همچون ICA و ژنتیک برای توابع هدف مختلف در شبکه توزیع.

مراجع

- [۱] H. Abdi, S. D. Beigvand, and M. L. Scala, "A review of optimal power flow studies applied to smart grids and microgrids," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. ۷۱, pp. ۷۴۲-۷۶۶, ۲۰۱۷.
- [۲] S. Bahramara, M. Parsa Moghaddam, and M. R. Haghifam, "A bi-level optimization model for operation of distribution networks with micro-grids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. ۸۲, pp. ۱۶۹-۱۷۸, ۲۰۱۶.
- [۳] N. Nikmehr and S. Najafi Ravadanegh, "A study on optimal power sharing in interconnected microgrids under uncertainty," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. ۲۶, pp. ۲۰۸-۲۳۲, ۲۰۱۶.

- [۴] X. Fang, S. Ma, Q. Yang, and J. Zhang, "Cooperative energy dispatch for multiple autonomous microgrids with distributed renewable sources and storages," *Energy*, vol. ۹۹, pp. ۴۸-۵۷, ۲۰۱۶.
- [۵] X. Fang, Q. Yang, J. Wang, and W. Yan, "Coordinated dispatch in multiple cooperative autonomous islanded microgrids," *Applied Energy*, vol. ۱۶۲, pp. ۴۰-۴۸, ۲۰۱۶.
- [۶] D. Gregoratti and J. Matamoros, "Distributed Energy Trading: The Multiple-Microgrid Case," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. ۶۲, pp. ۲۵۵۱-۲۵۵۹, ۲۰۱۵.
- [۷] A. Kavousi-Fard and A. Khodaei, "Efficient integration of plug-in electric vehicles via reconfigurable microgrids," *Energy*, vol. ۱۱۱, pp. ۶۵۳-۶۶۳, ۲۰۱۶.
- [۸] J. Vasiljevska, J. A. Peças Lopes, and M. A. Matos, "Integrated micro-generation, load and energy storage control functionality under the multi micro-grid concept," *Electric Power Systems Research*, vol. ۹۵, pp. ۲۹۲-۳۰۱, ۲۰۱۳.
- [۹] H. Dagdougui, A. Ouammi, and R. Sacile, "Optimal Control of a Network of Power Microgrids Using the Pontryagin's Minimum Principle," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. ۲۲, pp. ۱۹۴۲-۱۹۴۸, ۲۰۱۴.
- [۱۰] N. Nikmehr and S. Najafi-Ravadanegh, "Optimal operation of distributed generations in micro-grids under uncertainties in load and renewable power generation using heuristic algorithm," *IET Renewable Power Generation*, vol. ۹, pp. ۹۸۲-۹۹۰, ۲۰۱۵.
- [۱۱] H. Wang and J. Huang, "Bargaining-based energy trading market for interconnected microgrids," in ۲۰۱۵ *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. ۷۷۶-۷۸۱, ۲۰۱۵.
- [۱۲] E. M. Hammad, A. K. Farraj, and D. Kundur, "Grid-independent cooperative microgrid networks with high renewable penetration," in ۲۰۱۵ *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, pp. ۱-۵, ۲۰۱۵.
- [۱۳] J. Vasiljevska, J. A. P. Lopes, and M. A. Matos, "Multi-microgrid impact assessment using multi criteria Decision Aid methods," in ۲۰۰۹ *IEEE Bucharest PowerTech*, pp. ۱-۸, ۲۰۰۹.
- [۱۴] M. H. K. Tushar and C. Assi, "Optimal electricity pricing in a microgrid network," in ۲۰۱۶ *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, pp. ۱-۵, ۲۰۱۶.
- [۱۵] L. Xiao, N. B. Mandayam, and H. V. Poor, "Prospect Theoretic Analysis of Energy Exchange Among Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. ۶, pp. ۶۳-۷۲, ۲۰۱۵.
- [۱۶] S. D. Manshadi and M. E. Khodayar, "Resilient Operation of Multiple Energy Carrier Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. ۶, pp. ۲۲۸۳-۲۲۹۲, ۲۰۱۵.
- [۱۷] P. P. Vergara, J. C. López, L. C. P. da Silva, and M. J. Rider, "Security-constrained optimal energy management system for three-phase residential microgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. ۱۴۶, pp. ۳۷۱-۳۸۲, ۲۰۱۷.
- [۱۸] M. Karami, H. A. Shayanfar, J. Aghaei, and A. Ahmadi, "Scenario-based security-constrained hydrothermal coordination with volatile wind power generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. ۲۸, pp. ۷۲۶-۷۳۷, ۲۰۱۳.
- [۱۹] M. Nemati, M. Braun, and S. Tenbohlen, "Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming," *Applied Energy*, vol. ۲۱۰, pp. ۹۴۴-۹۶۳, ۲۰۱۸.
- [۲۰] Z. Li and Y. Xu, "Optimal coordinated energy dispatch of a multi-energy microgrid in grid-connected and islanded modes," *Applied Energy*, vol. ۲۱۰, pp. ۹۷۴-۹۸۶, ۲۰۱۸.
- [۲۱] B. Li, R. Roche, and A. Miraoui, "Microgrid sizing with combined evolutionary algorithm and MILP unit commitment," *Applied Energy*, vol. ۱۸۸, pp. ۵۴۷-۵۶۲, ۲۰۱۷.
- [۲۲] Mansouri, Taha, and Mohammad Reza Sadeghi Moghadam. "Markowitz-based cardinality constrained portfolio selection using Asexual Reproduction Optimization (ARO)." *arXiv preprint arXiv:2101.03312* (۲۰۲۱).
- [۲۳] Leonori, Stefano, et al. "Optimization strategies for Microgrid energy management systems by Genetic Algorithms." *Applied Soft Computing* ۸۶ (۲۰۲۰): ۱۰۵۹۰۳.
- [۲۴] Wang, Guo, et al. "Optimal planning of multi-micro grids based-on networks reliability." *Energy Reports* ۶ (۲۰۲۰): ۱۲۳۳-۱۲۴۹.