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

حسین شهامتی نژاد[۱]، سید محمد صادق زاده[۲]

چکیده

تاریخ دریافت:
۱۴۰۰/۱۱/۱۱
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۰۹/۲۸
کلمات کلیدی:
بهره‌برداری ریز شبکه، ریزشبکه های چندگانه، قابلیت اطمینان، الگوریتم ARO.

امروزه تعداد ریزشبکه‌های توزیع رو به افزایش است. در این میان به دلایل مختلف که در حوزه شبکه‌های هوشمند و بازار برق قابل توجیه است بهره‌برداری بهینه از این ریزشبکه‌ها دارای اهمیت بالایی می‌باشد. از طرفی وجود حوادث با شدت بالا دلایل ایجاد ریزشبکه‌ها در بسیاری از کشورها بوده است که اهمیت بهره‌برداری از ریزشبکه‌های چندگانه جهت مقابله با این حوادث را نشان می‌دهد. در این مقاله بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌های به هم پیوسته جهت پاسخگویی به شرایط عادی و بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که ریزشبکه‌های 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 ریزشبکه‌ها یکی از مواردی است که برای تامین شرایط بهینه‌سازی ریزشبکه‌ها 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.

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

[۲] دانشیار دانشگاه شاهد، تهران، ایران، کد پستی۱۸۶۵۱۳۳۱۹۱ ، (email: sadeghzadeh@shahed.ac.ir)

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

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 همچین با توجه به قابلیت‌های فراوان ریزشبکه‌ها در سیستم‌های توزیع و به طور کلی شبکه‌های هوشمند، بهره‌برداری از این چنین سیستم‌ها دارای چالش‌ها و فرصت‌های بسیاری نسبت به نسل مرسوم سیستم‌های توزیع خواهند بود. با توجه به وجود انواع مختلف منابع تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر و قابلیت جزیره‌سازی ریزشبکه‌ها، بررسی مساله‌ی در مدار قرارگیری منابع تولید پراکنده در ریزشبکه ها و به دنبال آن مشارکت ریزشبکه ها در شبکه‌ی توزیع هوشمند ضروری به نظر می‌رسد.

مرجع [۲] با ارایه‌ی مدل دوسطحی برای مساله‌ی بهره برداری بهینه سازی انجام داده است. به طوری که سود شرکت توزیع مسئله‌ی سطح بالا و سطح پایین مساله در مورد هزینه‌ی ریز شبکه‌ها است. نقش تاثیر گذار ساختار بازار انرژی درسود و هزینه‌های ریز شبکه مورد بررسی قرارگرفته است. افزایش قابلیت اطمینان با ارایه یک مدل احتمالی برای بار و منابع انرژی، به عنوان یک هدف برای بهینه سازی یک شبکه با ریزشبکه های به هم متصل در مرجع [۳] بررسی شده است.

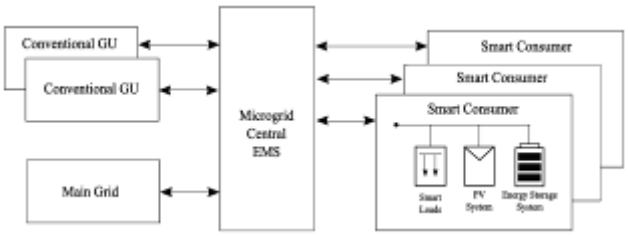
برای یک شبکه با چند ریزشبکه ی متصل به هم یک مدل جدید برای مطالعه تلفات و قابلیت اطمینان تحلیل و بررسی شده است [۴]. مرجع [۵] بهره برداری از چندین ریزشبکه با منابع تجدید پذیر مختلف به طوری که ازشبکه ی توزیع اصلی مستقل هستند بررسی کرده است. بهینه سازی توان مبادله ای بین چند ریزشبکه که به هم دیگر متصل هستند 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه ها در یک سیستم با چند ریزشبکه یک مساله ی بهینه سازی حل شده است. به دلیل وجود عدم قطعیت در سیستم هوشمند با چند ریزشبکه مساله ی پخش بار در [۱۰] به صورت احتمالی انجام شده است. داد و ستد و معامله ی توان بین ریزشبکه ها در یک محیط تجدید ساختار یافته در مرجع [۱۱] ارایه شده است. در یک شبکه ی توزیع با چند ریزشبکه 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 ریزشبکه و شبکه های با چندین ریزشبکه 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 ریزشبکه مطالعه شده است که ریزشبکه ها به عنوان فروشنده ی توان یا خریدار آن مدل شده است. بهره برداری در زمان وقوع حوادث غیر مترقبه درشبکه ای با چند ریزشبکه مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶].

در مقاله ی [۱۷] برای مدیریت انرژی ریزشبکه هایی با بار خانگی با خطی سازی مساله مدل مساله به صورت خطی همراه با متغییر صحیح آمیخته مدلسازی شده است. هدف مساله ی پیشنهاد شده حداقل سازی هزینه ی بهره بردرای 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 مدارقرار گیری واحد های تولید توان در مدیریت انرژی سیستم توزیع انرژی نشان می‌دهد.

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.

[۱] Micro Grid

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]



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 ریزشبکه با هدف حداقل سازی هزینه های بهره برداری، نگه داری و تلفات۴ و... با تمرکز بر حداقل کردن وابستگی ریزشبکه ها به شبکه ی اصلی توزیع ارایه کرده است.

نویسندگان [۲۰] با معرفی ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 بهره‌برداری واحد های تولید پراکنده مختلف در شبکه ای با چند ریز شبکه و هم چنین مشارکت ریزشبکه 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 ریزشبکه به طوری که تمام بار های خانگی، صنعتی، خانگی و دانشگاهی در ریزشبکه ها به طور جداگانه فرض شده هم چنین انواع مختلف منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر در ریزشبکه ها فرض شده و مساله ی مشارکت ریزشبکه ها مطالعه می شود.

۲. مدلسازی مساله مشارکت بهینه ریزشبکه‌ها در برنامه‌ریزی روزانه یک شبکه توزیع هوشمند

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

۱- یک یا مجموعه ای از ریزشبکه 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 ریزشبکه های مجاور و یا ریزشبکه هایی که باهم ارتباط غیر مستقیم از طریق ریزشبکه های دیگر دارند اتفاق بیفتد.

۴- ریزشبکه ای اجازه ترانزیت انرژی را از بستر خود ندهد.

۵- به دلایل خاص مانند بهبود تاب آوری سیستم یک یا مجموعه ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه ها در حالات مختلف بهره برداری با حفظ سایر قیود فراهم شود. از این منظر هر کدام از ریزشبکه 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 ریزشبکه ها موجود نمی باشند بنابراین هر کدام از ریزشبکه ها دارای پتانسیل متفاوت در بهره برداری می باشند که می توانند به کمک هم آمده و شرایط بهر برداری بهتری را فراهم نمایند.

---

[۱] loss

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

در این قسمت مدل ریاضی مشارکت بهینه ریزشبکه ها در یک شبکه توزیع هوشمند مدلسازی می گردد.

فرض کنید که یک شبکه توزیع دارای MG عدد ریزشبکه باشد به طوری که از یک یا چند نقطه به شبکه توزیع اصلی و یا به ریزشبکه‌هایدیگر 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 ریزشبکه mg در ساعت t و سناروی s در حالت کلی می تواند از رابطه زیر محاسبه گردد.

$$\begin{aligned} P_{mg,t,s} &= v_{chp}(t)P_{chp,t,s} + v_{FC}(t)P_{FC,t,s} + \\ & v_{MT}(t)P_{MT,t,s} + v_{WT}(t)P_{WT,t,s} + v_{PV}(t)P_{FV,t,s} \\ &= \sum_{der=1}^{N_{DER}} P_{der_{m,t,s}} \end{aligned} \qquad (۱)$$

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 $P_{FV,t}$ 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 ریزشبکه m می باشد. بدیهی است که هر کدام از منابع در برخی از ریزشبکه ها موجود می باشند و ممکن است در ریزشبکه 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.

$$P_{LM,t} = \sum_{b}^{B_m} P_{Lb,t} \qquad (۲)$$

که در آن B_m تعداد کل باسبارهای ریزشبکه m است.

برای هر ریز شبکه در حالت متصل به شبکه اصلی و یا متصل به ریزشبکه های دیگر معادله تعادل توان به صورت زیر است.

در صورتیکه ریز شبکه در حالت متصل به شبکه و نیز متصل به ریزشبکه های دیگر باشد معادله تعادل توان از رابطه (۳) محاسبه خواهد شد.

$$\begin{aligned} \sum_{der=1}^{N_{DER}} P_{der_{m,t,s}} &= \sum_{b}^{B_m} P_{Lb,t} + P_{Loss_{m,t,s}} \\ &+ D_{Net_{t,s}} \times P_{Net_{t,s}} + \sum_{\substack{mc=1 \\ mc \neq m}}^{M_C} D_{mc,t,s} P_{mc,t,s}^{Tr} \end{aligned} \qquad (۳)$$

در معادله (۳) $D_{Net,t}$ یک عدد صحیحی از مجموعه (۱- ، ۰ ، ۱) انتخاب می گردد و نحوه جهت عبور توان بین ریزشبکه و شبکه اصلی را نشان می‌دهد. همچنین $D_{mc,t,s}$ عدد صحیح از مجموعه (۱-، ۰، ۱) بوده و نحوه عبور ترانزیت توان و انرژی بین ریزشبکه و ریزشبکه های همسایه را در ساعت t نشان می‌دهد. $P_{Net,t}$ توان مبادله شده ریزشبکه با شبکه اصلی و $P_{mc,t,s}^{Tr}$ توان تبادلی بین ریزشبکه‌هایمجاور و M_C تعداد ریزشبکه های متصل به ریزشبکه m است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

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

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

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

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

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

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

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

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

با جایگزینی روابط (۲) در معادله (۵) :

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

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.

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

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

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

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

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

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

$$COST_{DNO} = \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{MG}[U_m(t)\times Cost_{m,t,s} + U_{Net}(t)\times Cost_{Net,t,s}] \quad (۱۲)$$

$$Cost_{m,t,s} = Cost_{Dsp_{m,t,s}} + Cost_{NDsp_{m,t,s}} \quad (۱۳)$$

$$Cost_{Dsp_{m,t,s}} = \alpha P^2_{Dis_{m,t,s}} + \beta P_{Dis_{m,t,s}} + \gamma \quad (۱۴)$$
$$P_{Dis} \in (CHP, MT, FC)$$

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

$$Cost_{NDsp_{m,t,s}} = aP^2_{Dis_{m,t,s}} + bP_{Dis_{m,t,s}} + c \quad (۱۴)$$
$$P_{NDis} \in (WT, PV)$$

در این مطالعه ضرایب a و b برای منابع غیرقابل کنترل در تمامی ریزشبکه 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.

$$COST_{DNO} = \sum_{m=1}^{MG}\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{N_s}[U_m(t)\times (Cost_{Dsp_{m,t,s}} + Cost_{NDsp_{m,t,s}})] + U_{Net_{t,s}}(t)\times Cost_{Net_{t,s}} \quad (۱۵)$$

$$COST_{DNO} = \sum_{m=1}^{MG}\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{N_s}[U_m(t)\times ((\sum_{k=1}^{N_{CHP,m}} Cost_{CHP_{m,t,s,k}} + \sum_{k=1}^{N_{MT,m}} Cost_{MT_{m,t,s,k}} + \sum_{k=1}^{N_{FC,m}} Cost_{FC_{m,t,s,k}}) + (\sum_{k=1}^{N_{WT,m}} Cost_{WT_{m,t,s,k}} + \sum_{k=1}^{N_{PV,m}} Cost_{WT_{m,t,s,k}})] + U_{Net_{t,s}}(t)\times Cost_{Net_{t,s}}) \quad (۱۶)$$

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

$$\forall m \in MG: \quad U_m(t).P^{\min}_{m,t,s} \le P_m(t) \le U_m(t).P^{\max}_{m,t,s} \quad (۱۷)$$

$$\forall m \in MG: \quad U_m(t).(\sum_{der=1}^{N_{DER}} P_{DER_{m,t,s}})^{\min} \le P_m(t) \le U_m(t).(\sum_{der=1}^{N_{DER}} P_{DER_{m,t,s}})^{\max} \quad (۱۸)$$

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.

$$\forall m \in MG: \begin{cases} (1-U_m(t+1)).MUT_m \le Don_m(t) & if\ U_m(t)=1 \\ U_m(t+1).MDT_m \le Doff_m(t) & if\ U_m(t)=0 \end{cases} \quad (۱۹)$$

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 بهینه‌سازی تولیدمثل غیرجنسی(ARO)

روش های گوناگونی برای بهینه‌سازی 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 می‌شود؛ این امر دقیقاً همانند بازنمایی باینری در الگوریتم‌های تکاملی است. یک بردار متغیر تصمیم x در مسأله بهینه‌سازی $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ که $X \in R^n$

[۵] Budding

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

یک فرد در ARO نامیده می‌شود و هر متغیر تصمیم x_i به صورت یک کروموزم در نظر گرفته می‌شود که از تعدادی بیت با نام ژن تشکیل شده است. یک کروموزم با طول L در نظر گرفته می‌شود، در این کروموزم، اولین بیت نشان دهنده علامت متغیر است. $L_۱$ بیت اول، بخش صحیح متغیر تصمیم را نشان می‌دهند در حالیکه، $L_۲$ بیت آخر نیز بخش اعشاری متغیر تصمیم را بیان می‌کنند. واضح است هرچه تعداد بیت‌های بخش اعشاری $L_۲$ بزرگتر شود، دقت متغیر تصمیم نیز بیشتر خواهد شد. در نتیجه طول هر کروموزم برابر است با: $l = l_۱ + l_۲ + ۱$ 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. به‌طور مثال، فضای جستجو $R^۲$ برای متغیر $X = (x_۱, x_۲)$ 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 باد 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 باد 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

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

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

[۶] Pseudo code

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

دارای g بیت است، یک ژن به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است g دارای توزیع یکنواخت در بازه [۱,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 جهش‌یافته از والد خود می‌باشد. لارو جستجو در فضا را به شکل مطلوبی انجام می‌دهد اما بهره‌گیری از اطلاعات نسل‌های قبلی را به‌خوبی 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 کاملا 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 می گردد .
۳- اندازه برازندگی این والد با استفاده از تابع هدف اندازه گیری می شود.
۴- والد با استفاده از عملگر بازتولید یک باد تولید می کند. به شرح زیر:

۵- قبل از برازندگی، موجه بودن باد آزمون می شود در صورتیکه موجه نباشد با یک مکانیسم تعمیر می گردد و سپس برازندگی باد، اندازه گیری می شود.
۶- با مقایسه مقدار تابع هدف والد و باد، هر کدام که از برازندگی بهتری برخوردار باشند برای تولید نسل بعدی انتخاب می شوند.

این روند تا رسیدن به شرایط توقف که تعداد تکرار است، ادامه می یابد.

۴.شبیه سازی و تحلیل نتایج

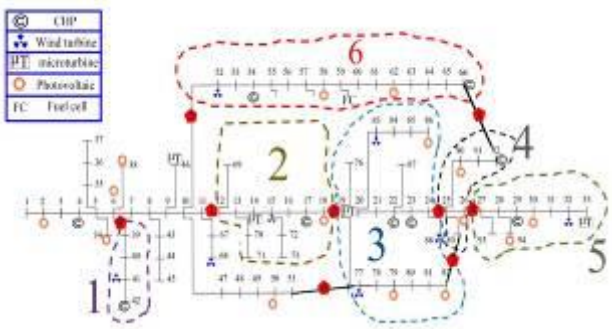
در این بخش ابتدا شبکه‌ی مورد مطالعه معرفی و بررسی وسپس نتایج شبیه‌سازی ارایه شده اند.

۴,۱.اطلاعات سیستم

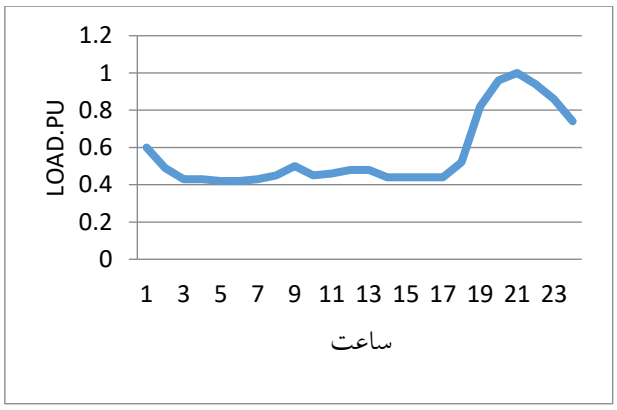
شبکه‌ی مورد مطالعه در این مقاله، شبکه‌ی تغیر یافت توزیع شعاعی ۹۴ باسه کشور پرتغال می باشد که در شکل (۲) نشان داده شده است [۳۶]. این سیستم ، بصورت ۶ ریزشبکه با کاربری های گوناگون خانگی، تجاری، صنعتی و دانشگاهی که در آن ریزشبکه‌های۱ ،۲ و ۵ کاربری خانگی ، ریزشبکه ۳ کاربری تجاری ، ریز شبکه ۴ دانشگاه و ریز شبکه ۶ با کاربری صنعتی فرض شده است. شکل های (۳) الی (۶) پروفیل بار مربوط به هر کاربری را در ۲۴ ساعت نشان میدهد. ریز شبکه ۱ و ۵ با یک کلید ، ریز شبکه ۲ و ۶ با دو کلید و ریزشبکه های ۳ و ۴ با چهار کلید به شبکه اصلی و سایر ریز شبکه ها متصل شده اند که مجموعا ۹ کلید در کل شبکه فرض شده است. قیود امنیتی مربوط به مدت زمان اتصال و جدا شدن هر ریزشبکه از سایر ریزشبکه ها و شبکه اصلی مطابق جدول(۱) فرض شده است. در ریزشبکه ها ی فرض شده منابع تولید پراکنده‌ی مختلف تجدیدپذیر و

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

غیرتجدیدپذیر از قبیل CHP[۷] ، سلول های فتوولتائیک (PV)[۸] ، توربین های بادی[۹] ، میکرو توربین[۱۰] و پیل سوختی [۱۱] طبق شکل (۲) وجود دارد.

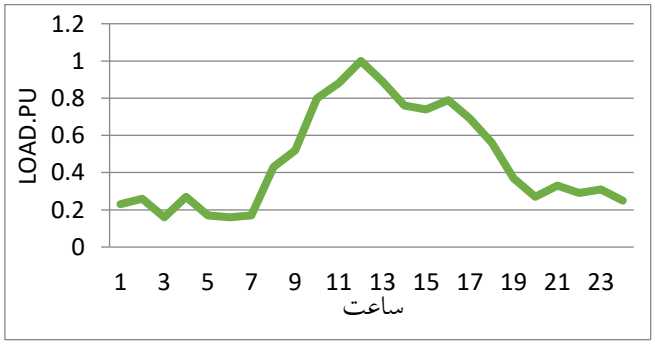


شکل (۲): شکل کلی سیستم ۹۴ باسه و ۶ ریز شبکه فرض شده همراه با منابع تولید پراکنده



شکل (۳): پروفیل بار در کاربری خانگی

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

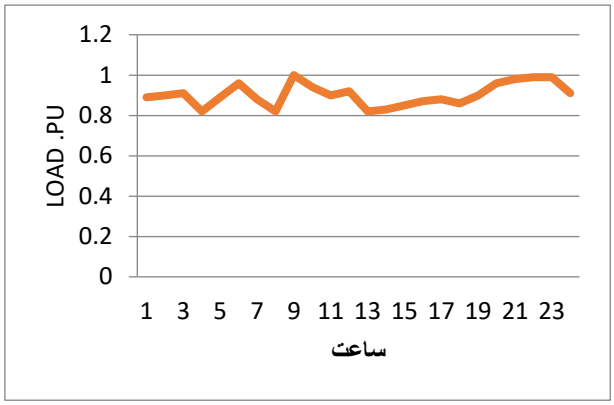


شکل (۴): پروفیل بار در۲۴ ساعت در کاربری دانشگاه

[۱] Combined Heat and Power
[۲] Photovoltaics
[۳] Wind Tubine
[۴] Micro Turbine
[۵] Fuel Cell

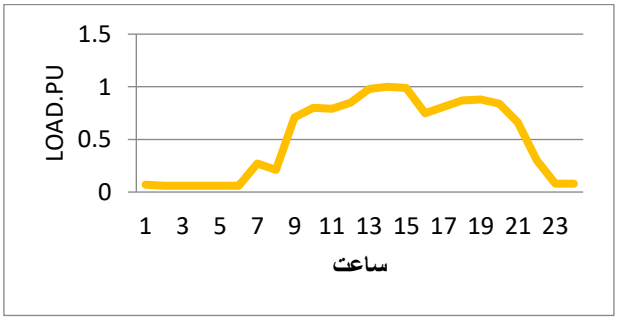
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

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 تقریبا 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 ریزشبکه‌ها

شماره ریزشبکه	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 ریزشبکه و کمترین زمان جزیره بودن ریزشبکه را نشان می‌دهد. در این جدول منظور ازMUT کمترین زمان متصل بودن یک ریزشبکه به شبکه اصلی یا ریز شبکه ها و منظور از MDT کمترین زمان منفصل بودن یک ریزشبکه از شبکه اصلی یا ریزشبکه‌های دیگر را نشان می‌دهد.

برای نمونه اگر ریزشبکه 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 تغیر حالت دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

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 ریزشبکه متناظر را از لحاظ قیود MUT و MDT در نظر داشت برای مثال اگر ریزشبکه 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 ریزشبکه‌های 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 ریزشبکه شماره ۳ از طریق ۴ کلید به سایرین متصل می گردد.

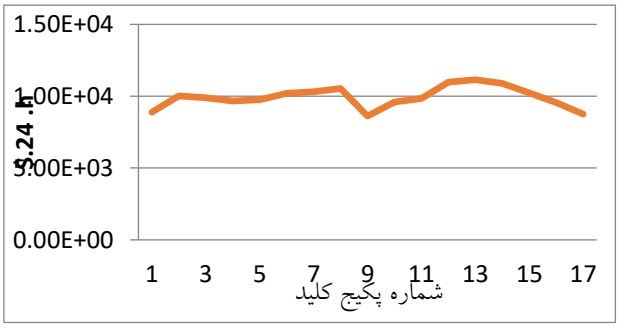
جدول (۲): کلید های متناظر هر ریزشبکه

شماره ریزشبکه	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 باتوجه به قیود امنیتی می باشد . جدول (۱) قیود امنیتی و جدول (۲) کلید های متناظر هر ریز شبکه را نشان می‌دهد. 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 وآن 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.

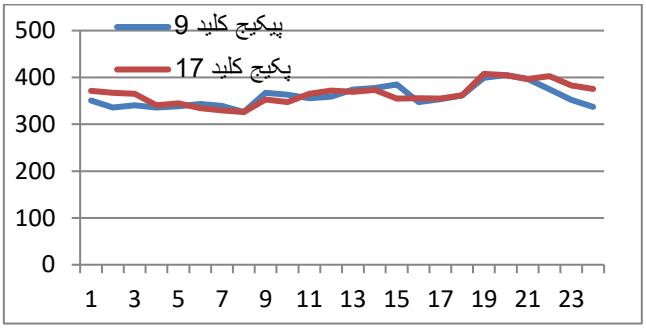
در این بخش هدف کمترین هزینه بهره برداری کل شبکه در ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است ، شکل (۷) نشان میدهد کمترین هزینه بهره برداری به پکیج کلید شماره ۹ با مقدار۸۶۱۶ $ می باشد.

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 در۲۴ ساعت تحت یک سناریوی مشترک (۱۳) مقایسه می کند.



شکل (۷): کمترین هزینه بهره برداری

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]



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. بنابر این انتخاب پکیج کلید ۹ با توجه به هدف ما که کمترین هزینه بهره برداری می باشد بهتر است. در این حالت آرایش ریزشبکه 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 ۱۷و آرایش ریزشبکه ها را در آن حالت نیز نشان میدهد.

جدول (۳): حالت بدست آمده ریزشبکه ها در پکیج کلید شماره۹

ساعت	شماره ریزشبکه					
	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

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

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	کلید۱	کلید۲	کلید۳	کلید۴	کلید۵	کلید۶	کلید۷	کلید۸	کلید۹
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 ریزشبکه ها در پکیج کلید شماره۱۷

ساعت	ریزشبکه۱	ریزشبکه۲	ریزشبکه۳	ریزشبکه۴	ریزشبکه۵	ریزشبکه۶
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

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

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

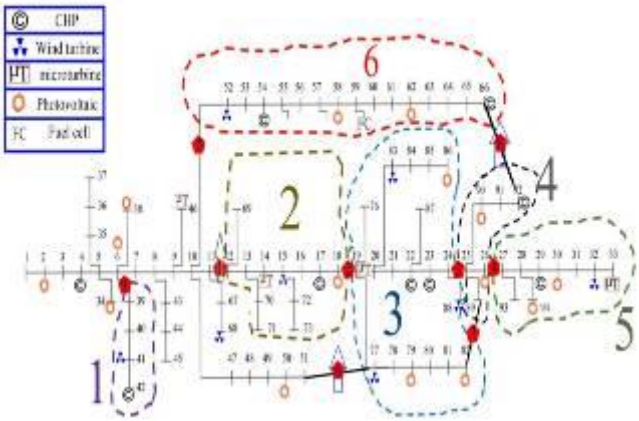
جدول (۶): پکیج کلید شماره ۱۷

ساعت	کلید۱	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 ریزشبکه 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 ریزشبکه 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) ، ریزشبکه ۱ دارای قید MUT=۳ و MDT=۲ 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 الی۱۱ بصورت جزیره ای به کار خود ادامه داده و از ساعت ۱۲ تا ۱۶ به شبکه متصل وسپس 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 شماره۹) 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.

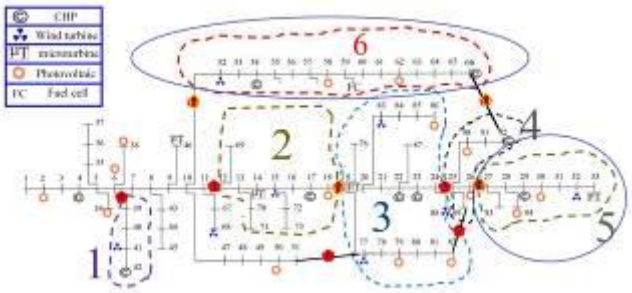
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

با اعمال پکیج وضعیت کلید ها در برنامه شبیه سازی، ساختار شبکه در زمان های مختلف با توجه به قیود تغیر 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.



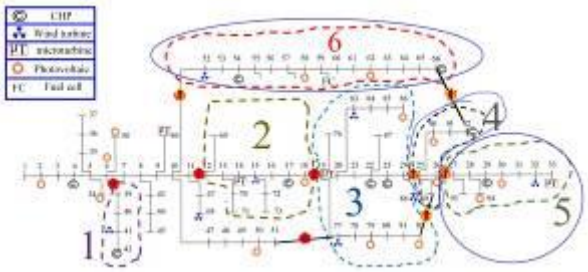
شکل (۱۰): شکل شبکه مورد مطالعه در ساعت ۱

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 نمیکند 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.

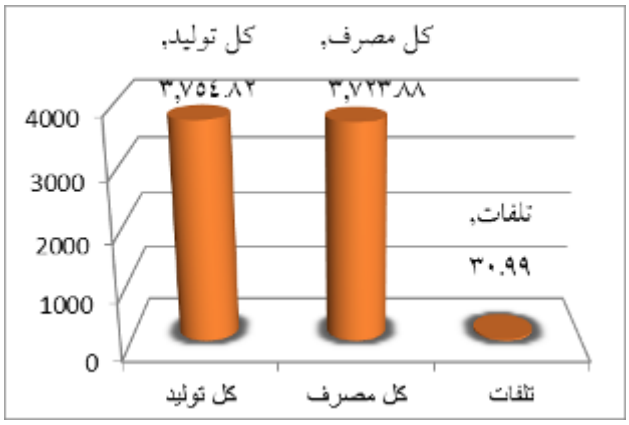


شکل (۱۲): شبکه مورد مطالعه در ساعت ۱۵

شکل (۱۲) وضیعت تغیر 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

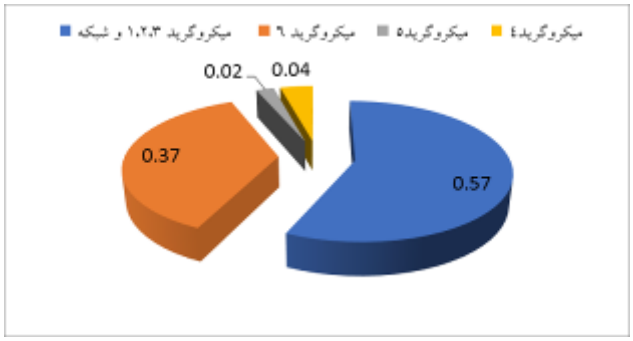
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

۶ به صورت جزیره ای می باشند. با توجه اینکه نتایج حاصله از وضعیت کلیدها و ریزشبکه 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.

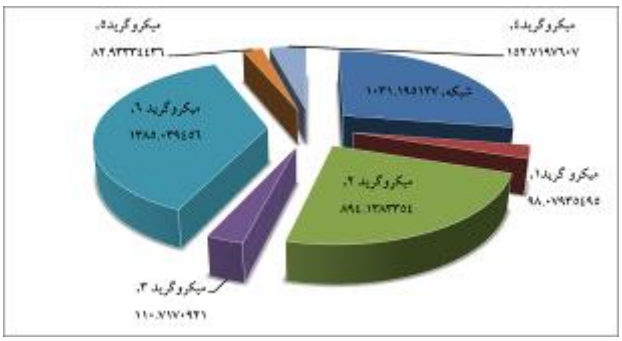


شکل(۱۳): توان تولیدی ، توان مصرفی و تلفات در ساعت ۱۵ سناریوی ۲

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 مقدارکل توان مصرفی(۳۷۲۳,۸۸ کیلووات) و تلفات کل (۳۰,۹۹ کیلو وات) میباشد.



شکل (۱۴): میزان مشارکت در تولید در ساعت ۱۵ به تفکیک ریزشبکه‌هایجزیره شده و متصل به هم

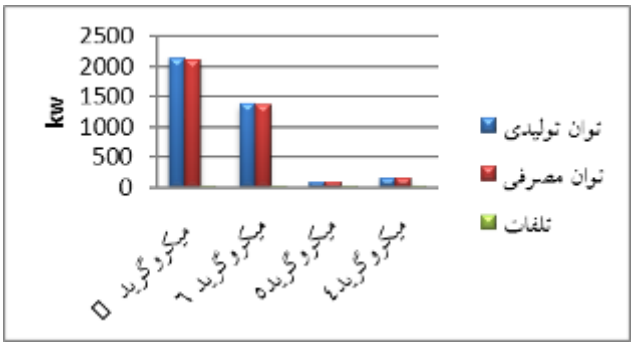


شکل (۱۵): مشارکت ریز شبکه ها در تولید در ساعت ۱۳

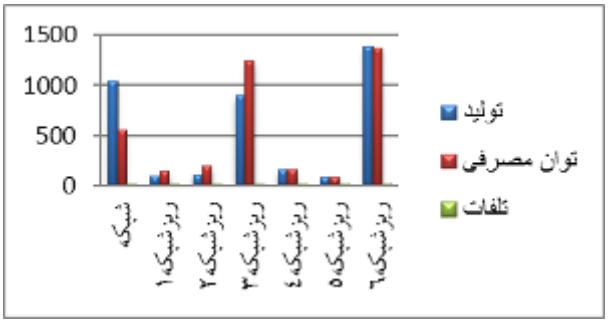
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

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 ۱۳۸۵,۰۳کیلو وات به ریز شبکه شماره ۶ که کاربری صنعتی دارد مربوط است .

علاوه بر رعایت قید برابری توان تولیدی و با مجموع توان مصرفی وتلفات 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 ریزشبکه‌های۴ ، ۵ ، ۶ صادق می باشد ، از آنجا که ریزشبکه‌های۱، ۲ و ۳ به شبکه وصل میباشند این قید برای مجموع آنها برابر است. شکل (۱۷) جزئیات میزان توان تولیدی و مصرفی در ریزشبکه‌های۱، 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 ریزشبکه های ۱،۲،۳ و شبکه اصلی در ساعت ۱۳ را نشان می‌دهد. فیدر۶-۳۹ مرز بین شبکه و ریز شبکه ۱ ،فیدر ۱۱-۱۲ مرز ریزشبکه ۲ وشبکه ،فیدر ۱۹-۱۸ مرز بین ریز شبکه۲ و ریز شبکه ۳ ، فیدر ۷۷-۵۱ مرز ریز شبکه ۳ و شبکه اصلی می باشد. با توجه به نمودار شکل (۱۷) توان تولیدی ریزشبکه‌های۱،۲و ۳ کمتر از توان مصرفی آن ها می باشد بنابر این برای تعادل توانی نیاز به واردات توان از شبکه اصلی می باشد.

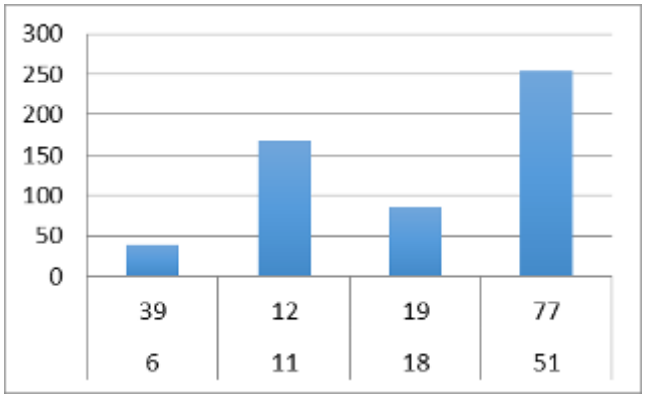
جدول(۷): میزان توان تولیدی ،مصرفی و تلفات در ساعت ۱۵

	توان تولیدی	توان مصرفی	تلفات	توان اضافی
شبکه	۵۵۱,۳۱	۱۰۳۱,۱۹	۸,۹۹	۴۷۰,۹۸
ریزشبکه۱	۱۳۷,۶۹	۹۸,۰۷	۰,۹۹	-۴۰,۶۱
ریزشبکه۲	۱۹۲,۵۱	۱۱۰,۷۱	۵,۴۱	-۸۷,۱۹
ریزشبکه۳	۱۲۳۵,۳۵	۸۹۴,۱۳	۱,۹۲	-۳۴۳,۱۲

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

ریزشبکه۴	۱۵۲,۴۴	۱۵۲,۷۱	۰,۲۷	۰
ریزشبکه۵	۸۲,۸۷	۸۲,۹۳	۰,۰۵۸	۰
ریزشبکه۶	۱۳۷۱,۶۸	۱۳۸۵,۰۳	۱۳,۳	۰

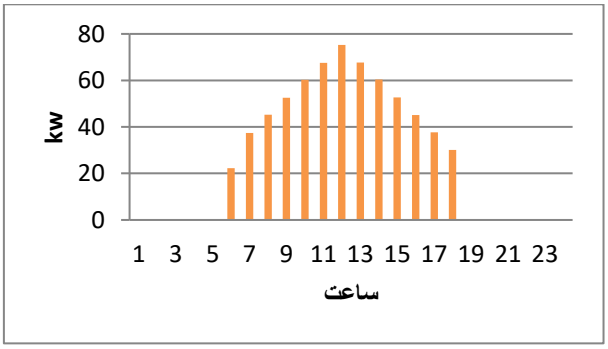
با توجه به داده های جدول (۷) شبکه اصلی ۴۷۰ کیلوات نیاز ۳ ریز شبکه ۱،۲و ۳ را تامین میکند و این توان ها از طریق فیدر های مرزی انتقال داده میشوند . طبق جدول ریز شبکه ۱ به مقدار ۶۱/۴۰ کیلو وات نیاز دارد این توان از طریق تنها فیدر آن (فیدر ۶-۳۹) به آن میرسد. شکل (۱۸) صحت این نتیجه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۸): توان عبوری از فیدر های مرزی ریزشبکه 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.

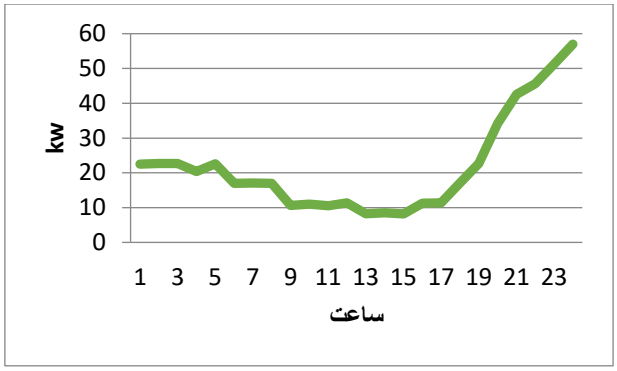
باتوجه به تعداد زیاد منابع تولید پراکنده و تعداد ریز شبکه ها به بررسی برخی از آنها می پردازیم شکل (۱۹) توان تولیدی منابع خورشیدی میکروگرید ۲ را در ۲۴ ساعت نمایش می‌دهد. با توجه مطابق شکل تولید توان طبق سناریو از ساعت ۶ با طلوع آفتاب شروع و تا غروب آفتاب ساعت ۱۸ ادامه می یابد.



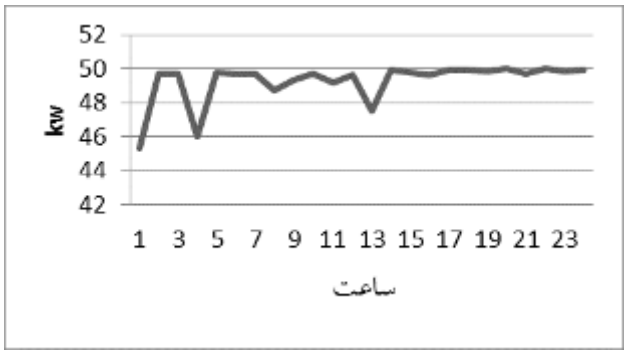
شکل (۱۹): توان تولید توسط منابع خورشیدی میکروگرید ۲در ۲۴ ساعت

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 اورده 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 می‌دهد.

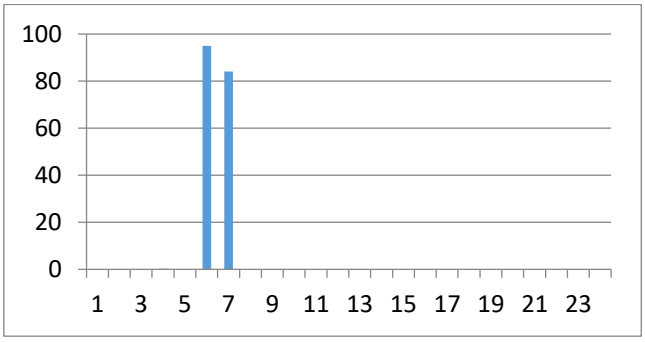
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]



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



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

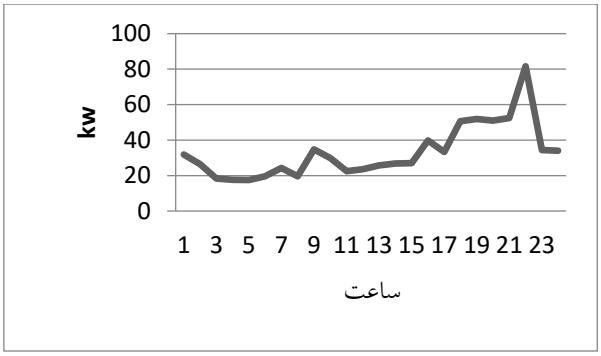


شکل (۲۲): توان تولیدی توسط منبع CHP در ریز شبکه شماره ۲ در ۲۴ ساعت

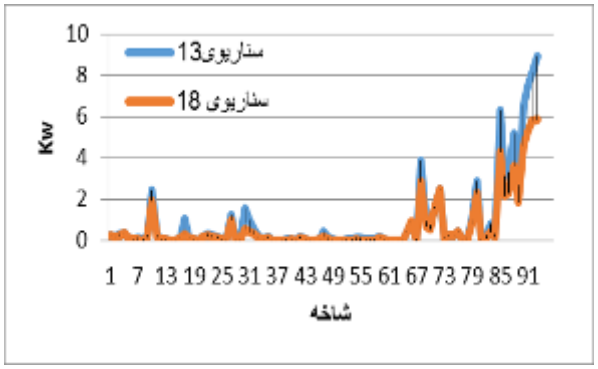
با توجه جدول (۳) ریز شبکه شماره ۲ تنها در ساعتهای ۶ و ۷ به صورت جزیره ای میباشد بنابراین با توجه به اینکه منبع CHP موجود در این ریز شبکه نسبت به منابع دیگر هزینه بهره برداری بیشتری دارد این ریز شبکه فقط در مواقع ضروری از این منبع استفاده میکند و در بقیه موارد توان مورد نیاز خود را از سایر ریز شبکه ها تامین میکند. طبق شکل (۲۲) تولید توان درمنبع CHP به طور عمده در ساعت ۶ و ۷ میباشد، مجموع توان تولیدی از این منبع در ۲۴ ساعت ۱۸۱ کیلو وات میباشد. شکل (۲۳) مجموع تلفات کل شبکه در ۲۴ را نشان می‌دهد طبق شکل بیشترین مجموع تلفات مربوط به ساعت ۲۲ میباشد که مقدار آن ۸۱,۶۱ کیلو وات است. در این حالت طبق جدول (۳) و (۴) هیچ ریزشبکه ای به صورت جزیره نمی باشدولی شبکه به دو قسمت تقسیم شده است که ریزشبکه های ۳،۴،۵و ۶ در یک طرف و بقیه ریزشبکه ها در طرف دیگر باهم 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 سناریوی۱۳ در ساعت ۲۲ می باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

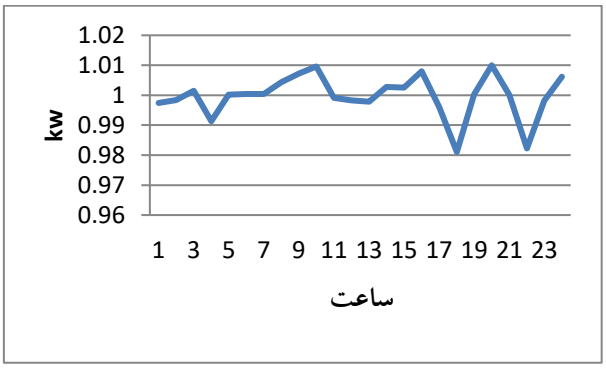


شکل (۲۳): تلفات کل شبکه در ۲۴ ساعت در سناریو۱۳



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

شکل (۲۵) پروفیل ولتاژ باس ۷۴ میکروگرید شماره ۲ را نشان میدهد. این میکرو گرید فقط در ساعت ۶ و۷ 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 ۰/۹۸۵ pu و در بیشترین حالت به میزان ۱/۰۰۵ 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 ارایه شده است. با توجه اشکال و جداول خروجی، نتایج حاصل نشان می‌دهد که توان های تولیدی در ریزشبکه 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 می‌دهد با کوچکتر و مورد بهره برداری قرار گرفتن ریزشبکه ها به صورت جزیره، ولتاژ باس ها به مقدار یک پریونیت نزدیک می شود.نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که امکان مدار آوردن ریز شبکه ها با در نظر گرفتن قیود امنیت وجود دارد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

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.

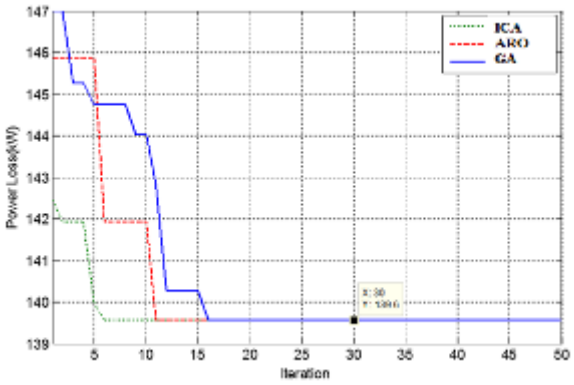
در جدول زیر، نتایج هر سه الگوریتم برای بهبود تلفات توان شبکه ۳۳ با سه، در حالت عدم حضور تولیدات پراکنده آورده شده است.

جدول ۸: مقایسه نتایج الگوریتم‌های مختلف برای بهبود تلفات توان در شبکه ۳۳ باسه 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 باسه 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 نحوه‌ی همگرایی هر سه الگوریتم برای حالات ذکر شده در بالا ترسیم گردیده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]



شکل ۲۶ : بهبود تلفات توان شبکه ۳۳ باسه 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 باسه در جدول زیر آورده شده است.

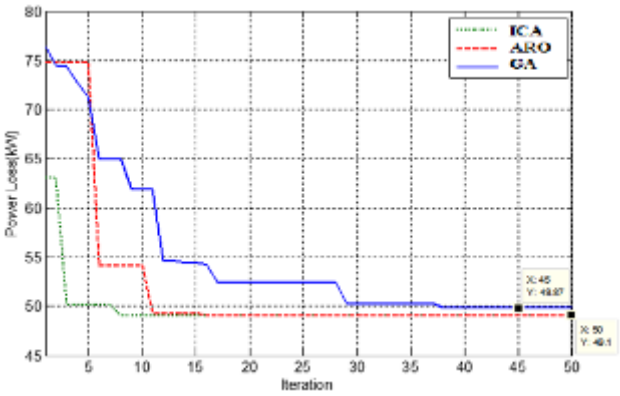
جدول ۹ : مقایسه نتایج الگوریتم‌های مختلف برای بهبود تلفات توان در شبکه ۳۳ باسه با حضور تولیدات پراکنده

	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 باسه، 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 عموما 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.

نحوه‌ی همگرایی این سه الگوریتم در حالت حضور تولیدات پراکنده نیز در شکل‌های زیر ترسیم شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]



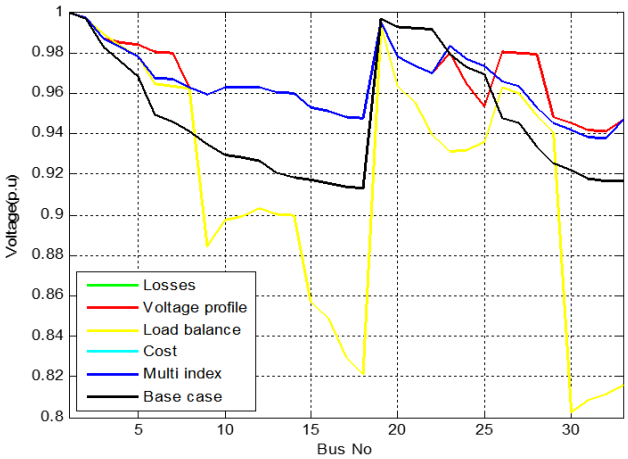
شکل ۲۷: بهبود تلفات توان شبکه ۳۳ باسه با حضور تولیدات پراکنده برحسب تعداد تکرار در الگوریتم‌های مختلف

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 مطلوط همگرا شده است.

با درنظر گرفتن مباحث مطرح شده، بطور کلی می‌توان گفت :

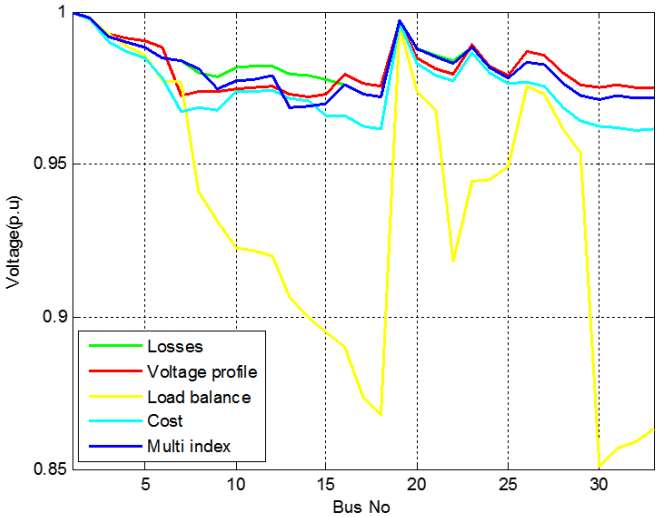
- الگوریتم ژنتیک در مسائل باینری توانایی مناسبی از خود نشان می‌دهد، در نتیجه در حالت عدم حضور تولیدات پراکنده، پاسخ‌های بسیار مطلوبی بدست آورده است.
- الگوریتم ICA بدلیل همگرایی پیش از موعد خود، در بسیاری از حالات پاسخ مطلوب را بدست نخواهد آورد.
- الگوریتم ARO ارائه شده، با تقسیم فضای جستجو قابلیت سرچ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

در ادامه پروفیل ولتاژ برای حالات گوناگون بهینه سازی 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 درحالت عدم حضور تولیدات پراکنده

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]



شکل ۲۹ : پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ باسه درحالت 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 قرمزرنگ) بدست آمده است.

۵.نتیجه گیری

در این مقاله علاوه بر برنامه ریزی در کل شبکه ی توزیع فرض شده و تمام ریزشبکه ها، مساله ی بهینه سازی بهره برداری در داخل هر ریزشبکه 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-تولیدالگوی 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 ، شـرایط عادی و بحرانی از قبیل شـرایط خاص تاب آوری ریزشـبکه وتامین قیود مربوطه از قبیل حالات کلیدهای بین ریز شبکه ها

۷- برتری همگرایی الگوریتم ARO پیـ شنهادی در مقابل دیگر الگوریتم‌های 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. ۷٤۲-۷٦٦, 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. ۲٦, pp. ۲۰۸-۲۳۲, ۲۰۱٦.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]

[٤]X. Fang, S. Ma, Q. Yang, and J. Zhang, "Cooperative energy dispatch for multiple autonomous microgrids with distributed renewable sources and storages," Energy, vol. ٩٩, pp. ٤٨-٥٧, ٢٠١٦.
[٥]X. Fang, Q. Yang, J. Wang, and W. Yan, "Coordinated dispatch in multiple cooperative autonomous islanded microgrids," Applied Energy, vol. ١٦٢, pp. ٤٠-٤٨, ٢٠١٦.
[٦]D. Gregoratti and J. Matamoros, "Distributed Energy Trading: The Multiple-Microgrid Case," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. ٦٢, pp. ٢٥٥١-٢٥٥٩, ٢٠١٥.

[٧]A. Kavousi-Fard and A. Khodaei, "Efficient integration of plug-in electric vehicles via reconfigurable microgrids," Energy, vol. ١١١, pp. ٦٥٣-٦٦٣, ٢٠١٦.
[٨]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. ٩٥, pp. ٢٩٢-٣٠١, ٢٠١٣.

[٩]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. ٢٢, pp. ١٩٤٢-١٩٤٨, ٢٠١٤.

[١٠]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. ٩, pp. ٩٨٢-٩٩٠, ٢٠١٥.

[١١]H. Wang and J. Huang, "Bargaining-based energy trading market for interconnected microgrids," in ٢٠١٥ IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. ٧٧٦-٧٨١,٢٠١٥.

[١٢]E. M. Hammad, A. K. Farraj, and D. Kundur, "Grid-independent cooperative microgrid networks with high renewable penetration," in ٢٠١٥ IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), pp. ١-٥, ٢٠١٥.

[١٣]J. Vasiljevska, J. A. P. Lopes, and M. A. Matos, "Multi-microgrid impact assessment using multi criteria Decision Aid methods," in ٢٠٠٩ IEEE Bucharest PowerTech, pp. ١-٨, ٢٠٠٩.

[١٤]M. H. K. Tushar and C. Assi, "Optimal electricity pricing in a microgrid network," in ٢٠١٦ IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), pp. ١-٥, ٢٠١٦.

[١٥]L. Xiao, N. B. Mandayam, and H. V. Poor, "Prospect Theoretic Analysis of Energy Exchange Among Microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. ٦, pp. ٦٣-٧٢, ٢٠١٥.

[١٦]S. D. Manshadi and M. E. Khodayar, "Resilient Operation of Multiple Energy Carrier Microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. ٦, pp. ٢٢٨٣-٢٢٩٢, ٢٠١٥.

[١٧] 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. ١٤٦, pp. ٣٧١-٣٨٢, ٢٠١٧.

[١٨] 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. ٢٨, pp. ٧٢٦-٧٣٧, ٢٠١٣.

[١٩] 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. ٢١٠, pp. ٩٤٤-٩٦٣, ٢٠١٨.

[٢٠] Z. Li and Y. Xu, "Optimal coordinated energy dispatch of a multi-energy microgrid in grid-connected and islanded modes," Applied Energy, vol. ٢١٠, pp. ٩٧٤-٩٨٦, ٢٠١٨.
[٢١] B. Li, R. Roche, and A. Miraoui, "Microgrid sizing with combined evolutionary algorithm and MILP unit commitment," Applied Energy, vol. ١٨٨, pp. ٥٤٧-٥٦٢, ٢٠١٧.
[٢٢] Mansouri, Taha, and Mohammad Reza Sadeghi Moghadam. "Markowitz-based cardinality constrained portfolio selection using Asexual Reproduction Optimization (ARO)." *arXiv preprint arXiv:2101.03312* (٢٠٢١).

[٢٣] Leonori, Stefano, et al. "Optimization strategies for Microgrid energy management systems by Genetic Algorithms." *Applied Soft Computing* ٨٦ (٢٠٢٠): ١٠٥٩٠٣.

[٢٤] Wang, Guo, et al. "Optimal planning of multi-micro grids based-on networks reliability." *Energy Reports* ٦ (٢٠٢٠): ١٢٣٣-١٢٤٩.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-03]