Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers
Vol. 23 No. 1, 2026
DOI: 10.61882/jiaeee.23.1.71

Changing Topology of Traditional Electrical Networks to Realize Electric Microgrid Structures

Mahdi Tourani[1]

[1] Assistant Professor, University of Birjand, South Khorasan, Iran
tourani.mahdi@birjand.ac.ir

Abstract:

Today, Microgrids are considered important components of the power system, with increased opportunities for their use in smart grids. These systems can operate independently or in grid-connected mode, producing and locally storing energy to meet the needs of their consumers. Numerous studies have been conducted on the operation of microgrids, proving their effectiveness. However, in the area of design and especially the groundwork for their establishment, considering technical, social, economic, and other considerations, there is significant scope for examination and research. This paper aims to address the redesign and topology change of the system to transform traditional electrical networks into modern microgrid structures while maintaining the maximum integrity of the traditional network and making minimal necessary changes. Therefore, objectives are defined to ensure the optimal functioning of the microgrid, followed by the exploration of the problem space using three algorithms: Firefly Algorithm, Grey Wolf Optimization, and Particle Swarm Optimization, combined with a Fuzzy Algorithm. The results of this model, along with the simulations performed, demonstrate the high accuracy of the algorithm.

Keywords: Geographical Considerations, Microgrid Topology, New Communication, Optimal Neighbors, Redesign

Article Type: Research

Received: 26. 07. 2021

Revised: 11. 05. 2025

Accepted: 03. 11. 2025

Corresponding author: M.Tourani

Corresponding author's address: Ferdows Technical and Engineering Dep., affiliated with Birjand University, Shahamat St., Valiasr Blv, Ferdows, South Khorasan Province, Iran.

Copyright © 2026 The Authors. Published by Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. Motivation of the work

The paper aims to design electrical microgrids within a power system by making maximum use of the existing structure. For this redesign, it is first necessary for the desired characteristics to be defined based on two fundamental attributes of a microgrid, after which the system reconfiguration is to be performed. These two attributes essentially comprise a coherent and robust internal microgrid during islanded operation and the presence of strong neighboring systems surrounding the microgrid during grid-connected operation.

2. Contributions

A strong and coherent microgrid is defined as one that can meet its local loads to the greatest extent possible. This load supply requires sufficient generation capacity as well as the presence of reliable lines and equipment for internal power delivery within the microgrid. Conversely, if for any reason the microgrid is unable to supply its local loads, its main grids must be configured such that connection to them can resolve the microgrid's deficit. The existence of strong and coherent neighbors can be evaluated from both hardware and software perspectives. Firstly, from a physical and hardware standpoint, a grid with connection capability must be available; meaning the necessary lines, equipment, or connection conditions must either pre-exist for the main grid or be established during the redesign. Secondly, from a software perspective, this neighboring grid itself must possess the requisite conditions, including the capability to supply the microgrid, both in terms of surplus generation capacity and a reliably structured system. Various constraints also exist in the microgrid design process, the most significant of which is maintaining the radial structure of both the microgrid and the main grids. This ensures the final structure remains simple and uncomplicated. The examination and definition of the objectives required for designing microgrids and main grids, alongside the modern redesign of the power system and its transformation into a collection of microgrids based on the provided definitions, constitute the innovations presented in this paper.

3. Procedures

To investigate and validate the problem presented in the paper, the IEEE 123-bus system is utilized as the current traditional test network. The implementation period for the plan is considered a ten-year program, incorporating both seasonal load variations and annual load growth. Subsequently, to determine the boundaries of each microgrid within the new structure along with the newly established topology, several scenarios are employed based on the paper's defined objectives. These scenarios are:

A: First Scenario: System reconfiguration focusing on each microgrid's self-sufficiency in supply.

B: Second Scenario: System reconfiguration focusing on optimal load distribution within each microgrid.

C: Third Scenario: System reconfiguration focusing on optimal load distribution across the entire system.

D: Final Proposed Scenario: System reconfiguration focusing on each microgrid's self-sufficiency in supply, optimal load distribution within each microgrid and across the entire system, and the suitability of the microgrid and its neighbors considering geographical constraints.

4. Findings

By implementing the model presented in the paper, a reconfiguration is performed on the traditional grid based on the objectives of improving each microgrid's supply, achieving optimal load distribution within each microgrid and across the entire system, and ensuring the suitability of the microgrid and its neighbors considering geographical constraints. Subsequently, the problem space is searched using the Firefly Algorithm, Grey Wolf Optimizer, and Particle Swarm Optimization algorithms combined with the Fuzzy Algorithm. The results obtained from this model, along with the performed simulations, demonstrate the high accuracy of the algorithm

5. Conclusion

The integration of small-scale and energy storage generation into low and medium voltage systems constitutes a new type of power system known as a microgrid. These systems can meet their customers' demands by aggregating and integrating renewable energies and other local power sources, or compensate for their power shortfall by drawing from upstream grids when necessary. Given the extensive studies in the field of microgrid operation and the proven efficacy of microgrids, the need for research in the design domain to create an appropriate structure and foundation is increasingly evident. For this purpose, this paper, through studying and defining suitable objectives that ensure desirable microgrid performance, addresses the reconfiguration and redesign of the traditional system for its conversion into a modern microgrid structure. The paper adopts two fundamental approaches: maximizing the preservation of the prior traditional system for economic reasons, and implementing minimal changes to meet the microgrid's requirements for technical reasons. By presenting the proposed model, which encompasses geographical, technical, and economic considerations, and simulating it using the Firefly Algorithm, Grey Wolf Optimizer, and Particle Swarm Optimization algorithms, significant results are obtained that enhance system performance

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال بیست و سوم، شماره اول، بهار ۱۴۰۵، صفحات ۷۱-۸۲

DOI: 10.61882/jiaeee.23.1.71

تغییر توپولوژی شبکه‌های سنتی به‌منظور تحقق ساختار ریزشبکه‌های الکتریکی

مهدی تورانی[۱]

۱- استادیار- دانشکده فنی و مهندسی فردوس- دانشگاه بیرجند- خراسان جنوبی- ایران

tourani.mahdi@birjand.ac.ir

چکیده: **امروزه ریزشبکه‌های الکتریکی از بسترهای مهم شبکه قدرت به شمار می‌آیند که امکان استفاده از آن در شبکه‌های هوشمند بیش‌ازپیش افزایش یافته است. این سیستم‌ها قادرند به‌صورت مستقل و یا در حالت متصل به شبکه، ضمن تولید و ذخیره محلی انرژی، نیاز مشترکین خود را تأمین نمایند. تاکنون مطالعات فراوانی در حوزه بهره‌برداری ریزشبکه صورت گرفته و کارایی آن به اثبات رسیده است. اما در حوزه طراحی و به‌خصوص بسترسازی ایجاد آن با توجه به ملاحظات فنی، اجتماعی، اقتصادی و .... محل بررسی و پژوهش بسیاری وجود دارد. در این مقاله سعی بر آنست با دو رویکرد حفظ حداکثری شبکه سنتی و ایجاد تغییرات حداقلی مناسب برای برطرف ساختن نیاز ریزشبکه به بازطراحی و تغییر توپولوژی سیستم به‌منظور تبدیل شبکه سنتی به ساختار نوین ریزشبکه ای پرداخته شود. به همین سبب اهداف موردنظر جهت تضمین عملکرد مطلوب ریزشبکه تعریف و سپس با استفاده از سه الگوریتم کرم شب‌تاب، گرگ‌های خاکستری و ازدحام ذرات در ترکیب با الگوریتم فازی فضای مسئله مورد جستجو واقع می‌شود. نتایج این مدل به همراه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، دقت بالای الگوریتم را نشان می‌دهد.**

کلمات کلیدی: **بازطراحی، توپولوژی ریزشبکه، ملاحظات جغرافیایی، مسیر ارتباطی جدید، همسایگی مطلوب**

نوع مقاله: **پژوهشی**

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهدی تورانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران، خراسان جنوبی- فردوس- بلوار ولیعصر- انتهای خیابان شهامت، دانشکده فنی و مهندسی فردوس وابسته به دانشگاه بیرجند

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۵ ©. ناشر این مقاله، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

با افزایش روزافزون مصرف، کنترل و مدیریت اجزای مختلف شبکه نقش بسزایی در شبکه قدرت ایفا می‌کنند. تولید بی‌رویه جهت پاسخ به این تقاضا، بدون وجود دو عنصر یادشده، ضمن افزایش هزینه‌ها، باعث کاهش بهره‌وری و قابلیت‌اطمینان به دلیل افزایش تعداد نیروگاه‌ها، افزایش تعداد خطوط و تجهیزات، حجم بالای تبادل توان و ... خواهد شد. از همین رو در ساختار جدید سیستم قدرت، استفاده از ظرفیت موجود و کنترل و مدیریت منابع موردتوجه قرار گرفته است. ازجمله این هدف‌گذاری‌ها، تعریف شبکه‌های هوشمند، ریزشبکه‌های الکتریکی و ... می‌باشد.

ریزشبکه‌های الکتریکی، یک شبکه توزیع الکتریکی در مقیاس کوچک [۱] با سطح ولتاژ پایین شامل منابع تولید هم‌زمان برق و حرارت و سایر منابع تولیدپراکنده برای تغذیه بارهای الکتریکی و حرارتی و نیز ابزارهای ذخیره‌سازی انرژی هستند که در یک ناحیه کوچک و تحت یک سیستم کنترلی عمل می‌کنند.

معمولاً تمرکز در تعریف ریزشبکه‌ها بر روی دو خصلت اساسی است:

- ریزشبکه یک سیستم محلی می‌باشد
- ریزشبکه می‌تواند به‌صورت مستقل و یا در حالت متصل به شبکه اصلی عمل نماید

هرکدام از این ویژگی‌ها ظرفیت‌هایی دارد که در طراحی و بهره‌برداری از ریزشبکه باید بدان پرداخته شود به دلیل نیاز به اثبات کارایی، تاکنون تلاش‌های بسیاری در تعریف مدل‌ها و رفع چالش‌ها در حوزه بهره‌برداری صورت گرفته است. در زمینه کنترل و مدیریت انرژی ریزشبکه، مراجع [۱۰-۲] تحقیقات متنوعی را انجام داده‌اند. اما همین مطالعات نیز از نظر تحلیل و بررسی ضعیف بوده و یا موارد جزئی را بررسی نموده‌اند. از دیگر چالش‌های پیش روی ریزشبکه، کنترل ولتاژ آن بوده که در مراجع [۱۷-۱۱] در این زمینه پژوهش‌های موثری به انجام رسیده است. کنترل توان اکتیو و راکتیو ریزشبکه که معمولاً کنترل جریان نیز نامیده می‌شوند و عموماً در حالت متصل به شبکه کاربرد دارد، در مراجع [۲۱-۱۸] موردپژوهش قرار گرفته است. کنترل انتقال شامل کنترل بهره‌برداری از حالت مستقل از شبکه به حالت متصل و یا برعکس به دلیل تغییر مکانیسم کنترل دارای چالش‌های متعددی مانند ناپایداری ولتاژ و فرکانس ریزشبکه بوده و در مراجع [۲۲-۲۸] بررسی شده‌اند. از دیگر مسائل ریزشبکه حفاظت بوده که نقش مهمی در قابلیت‌اطمینان سیستم دارد. مراجع [۳۳-۲۹] از این منظر به مطالعه ریزشبکه پرداخته‌اند.

امروزه خروجی و نتیجه این پژوهش‌ها تردیدی باقی نگذاشته است که حضور ریزشبکه‌ها تأثیر مطلوب و بسزایی بر صنعت برق خواهد داشت. حال این سؤال مطرح می‌شود که یک ریزشبکه مطلوب چه ساختار، ویژگی‌ها و محدودیت‌هایی دارد؟

بدیهی است که هرچه بستر اجرای پروژه بهتر و قوی‌تر باشد، امکان بازدهی اجرای طرح بیشتر و بهتر فراهم می‌گردد. بر خلاف پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه بهره‌برداری ریزشبکه، تلاش‌های کمتری در حوزه طراحی آن صورت گرفته است. نمونه این مطالعات را می‌توان در مراجع [۴۱-۳۴] یافت. در بین این نوع مقالات نیز توجه به پیکربندی و توپولوژی ریزشبکه کمتر مشاهده می‌شود و یا دارای خلأها و نقاط چالشی قابل‌ملاحظه‌ای است. در مرجع [۳۹] توپولوژی ریزشبکه موردبررسی قرار گرفته و ساختار نهایی با هدف کاهش تلفات و کاهش توان مبادله شده بین ریزشبکه‌ها بهینه گردیده است. در مرجع [۴۰] شاخص‌های قابلیت‌اطمینان برای خطاهای مانا و لحظه‌ای و شاخص کفایت انرژی مبنای پیکربندی شبکه قرار گرفته است. مرجع [۴۱] نیز پیکربندی و جایابی تولیدات پراکنده ریزشبکه را با اهداف قابلیت‌اطمینان بهینه‌سازی نموده است. در تمامی این مقالات، اجرای مدل تنها بر روی یک فیدر انجام می‌شود. همچنین عدم امکان انتخاب همسایه توسط ریزشبکه‌ها از دیگر نقاط ضعف مدل بوده و از مسائلی به شمار می‌آید که باید بر روی آن پژوهش بیشتری انجام شود.

بررسی مطالعات موجود ، نیاز به ارائه پژوهش‌هایی در حوزه طراحی ریزشبکه را بیش‌ازپیش نمایان می‌سازد. این طراحی باید به‌گونه‌ای باشد که با حداکثر استفاده از وضعیت موجود شبکه، کمترین هزینه و تغییر را در سیستم ایجاد نموده و در نهایت بهترین بستر ریزشبکه را فراهم آورد.

در این مقاله سعی بر آنست تا با بیشترین استفاده از ساختار موجود به طراحی ریزشبکه‌های الکتریکی در یک سیستم قدرت بپردازد. برای این بازطراحی ابتدا لازم است ویژگی‌های موردنظر بر پایه دو خصلت اساسی ریزشبکه تعریف و سپس به پیکربندی مجدد شبکه پرداخته شود. این دو خصلت عملاً شامل یک ریزشبکه منسجم و قوی در داخل به هنگام عملکرد مستقل و وجود شبکه‌های همسایه قوی در اطراف ریزشبکه به هنگام عملکرد متصل به شبکه است.

ریزشبکه ای قوی و منسجم می‌باشد که بتواند مصارف داخلی خود را تا حد امکان برآورده سازد. این تأمین بار شامل وجود تولید کافی و نیز وجود خطوط و تجهیزات قابل‌اطمینان جهت برق‌رسانی در داخل ریزشبکه است.

از طرفی اگر به هر دلیلی ریزشبکه نتواند مصارف داخلی خود را تأمین نماید، شبکه‌های بالادست آن باید به‌گونه‌ای باشند که بتوان با اتصال به آن نیاز ریزشبکه را برطرف نمود. وجود همسایه‌های قوی و منسجم از دو بعد سخت‌افزاری و نرم‌افزاری قابل‌بررسی است. یک آنکه از نظر فیزیکی و سخت‌افزاری باید شبکه‌ای با قابلیت اتصال موجود باشد، بدین معنی که خطوط، تجهیزات و یا شرایط موردنیاز اتصال به‌صورت سخت‌افزاری برای شبکه بالادست یا موجود باشد و یا در هنگام بازطراحی فراهم شود. و دوم از بعد نرم‌افزاری آنکه این شبکه همسایه خود باید دارای شرایطی از جمله امکان تغذیه ریزشبکه چه از نظر تولید مازاد و چه از نظر ساختار قابل‌اطمینان را داشته باشد.

محدودیت‌های مختلفی نیز در مسیر طراحی ریزشبکه وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها حفظ ساختار شعاعی ریزشبکه و شبکه‌های بالادست

است. این امر سبب می‌شود ساختار نهایی ساده و بدون پیچیدگی باشد.

بررسی و تعریف اهداف موردنیاز برای طراحی ریزشبکه‌ها و شبکه‌های بالادست و همچنین بازطراحی نوین شبکه قدرت و تبدیل آن به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌ها بر اساس تعاریف صورت گرفته از نوآوری‌های مطرح در این مقاله می‌باشند.

به دلیل حجم بالای محاسبات و بررسی شرایط در این مقاله، نیاز به استفاده از موتورهای جستجو نیرومند جهت بررسی فضای مسئله وجود دارد که بدین خاطر از سه الگوریتم کرم شب‌تاب (Firefly Algorithm)، گرگ خاکستری (Gray Wolf Optimization) و ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization) بهره‌گیری شده است. ازآنجایی‌که جنس اهداف در این مقاله متفاوت است، از الگوریتم فازی (Fuzzy Algorithm) در ترکیب با این سه الگوریتم برای حل مسئله استفاده شده و عملکرد آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در ادامه ابتدا در بخش دوم به بیان و تعریف مسئله پرداخته شده، اهداف مسئله و تابع ارزشیابی در بخش سوم و چهارم بیان می‌گردند. معرفی موتورهای جستجو در ترکیب با الگوریتم فازی در بخش پنجم و شبیه‌سازی و تحلیل نتایج در بخش ششم ارائه خواهد شد. در انتها نیز در بخش هفتم جمع‌بندی مقاله صورت می‌پذیرد.

۲- بیان مسئله

یکی از مفاهیم جدیدی که امروزه وارد صنعت برق شده، مفهوم ریزشبکه است. پیوستن تولیدات کوچک و ذخیره‌ای انرژی به سیستم‌های ولتاژ پایین و متوسط، نوع جدیدی از سیستم‌های قدرت بنام ریزشبکه را تشکیل می‌دهند. در زمینه بهره‌برداری از ریزشبکه تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای صورت گرفته است اما در این مقاله توجه اصلی بر طراحی بستر ریزشبکه معطوف می‌شود. ازآنجایی‌که معمولاً پیش از طراحی و اجرای ریزشبکه در مکان‌های مشخص، یک سیستم قدرت سنتی وجود داشته است، از نظر اقتصادی صرفه بر آنست که بجای طراحی، یک بازطراحی و پیکربندی مجدد بر روی شبکه سنتی جهت ساخت بستر ریزشبکه انجام شود.

برای انجام این کار ابتدا لازم است ساختار شبکه سنتی موردبررسی قرار گیرد. شبکه سنتی در حوزه توزیع و فوق توزیع دارای تعدادی فیدر با خطوط تغذیه شعاعی می‌باشند که در آن‌ها توان موردنیاز مصرف‌کنندگان تأمین می‌شود. هر فیدر و خطوط شعاعی متصل به آن، بخش مشخصی از یک محدوده جغرافیایی را پوشش می‌دهند. این محدوده جغرافیایی در مرزهای خود با مرزهای سایر محدوده‌های دیگر فیدرها، نزدیکی داشته، که این قرابت امکان اتصال فیدرها را از نظر جغرافیایی فراهم می‌آورد.

پس از معرفی ساختار سنتی در ادامه ویژگی‌های ظاهری ریزشبکه‌ها موردبررسی قرار می‌گیرد. ریزشبکه‌ها در یک محدوده جغرافیایی مشخص قرار داشته و با ساختار شعاعی و تولید محلی نیاز مشترکین خود را برآورده می‌سازند. همچنین ریزشبکه‌ها با تعداد محدودی خطوط تغذیه به همراه کلیدهای مجزاکننده به سایر شبکه‌های همسایه از نظر فیزیکی متصل بوده که می‌توانند در صورت لزوم از نظر الکتریکی نیز اتصال برقرار نمایند.

نکات مهمی در توپولوژی یک ریزشبکه منسجم وجود دارد که باید بدان توجه شود. تعداد مشترکین، میزان تولید ریزشبکه، ساختار ارتباطی بارها و تولیدات ریزشبکه، وجود شبکه بالادست متناسب با وضعیت ریزشبکه و مکان اتصال ریزشبکه به شبکه همسایه ازجمله آن‌هاست.

تعداد مشترکین باید هماهنگ با میزان تولید ریزشبکه باشد به‌نحوی‌که ریزشبکه بتواند در اکثر مواقع نیاز خود را برطرف نماید.

ساختار ارتباطی بارها و تولیدات باید به صورتی باشد که در صورت وقوع خطا و یا خروج تجهیزات کمترین خاموشی ممکن بر ریزشبکه تحمیل گردد. بدین ترتیب تولید در مرکز ثقل بار قرار داشته و قابلیت‌اطمینان افزایش می‌یابد.

ازآنجایی‌که وضعیت تولید و مصرف در هر ریزشبکه بنا به نوع تولید مانند فتوولتاییک، بادی و یا ... و نوع مصرف مانند خانگی، صنعتی و یا ... متفاوت است، وجود همسایگی متناسب با وضعیت ریزشبکه امری مهم به شمار می‌آید. به‌عنوان‌مثال اگر در یک ریزشبکه تولید غالب از نوع فتوولتاییک باشد بهتر خواهد بود شبکه همسایه آن به نحوی انتخاب شود که در ساعات شب، زمانی که ریزشبکه با کمبود تولید مواجه است، دارای تولید مازاد بوده و بتواند نیاز ریزشبکه را جبران نماید. از این نوع ساختارهای مکمل به‌وفور می‌توان تعریف نمود که تناسب میان ریزشبکه و همسایگان به نحو مطلوبی فراهم آمده است.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده، در این مقاله هدف بازطراحی و پیکربندی مجدد شبکه سنتی موجود جهت تبدیل آن به ساختار ریزشبکه ای می‌باشد.

وضعیت موجود، شبکه سنتی شامل چندین فیدر با خطوط برق‌رسانی شعاعی هستند که مجموعاً بخش جغرافیایی خاصی را تغذیه می‌نمایند. انتظار بر آنست که خروجی مدل پیشنهادی این مقاله شامل چندین ریزشبکه در همان محدوده جغرافیایی بوده که هر ریزشبکه شامل تعدادی بار، تولید مشخص و خطوط تغذیه شعاعی است. از طرفی هر ریزشبکه به تعداد مشخصی شبکه بالادست همسایه به‌وسیله کلیدهای مجزا کننده (در حالت عادی باز) اتصال فیزیکی داشته که در زمان موردنیاز این کلیدها اتصال الکتریکی را برقرار می‌نمایند و توان لازم از همسایه به ریزشبکه شارش می‌یابد.

متغیرهای مسئله تعداد بارها، تولید، خطوط تغذیه هر ریزشبکه به همراه خطوط متصل‌کننده ریزشبکه به شبکه‌های همسایه است، به‌نحوی‌که تا حد امکان از ساختار موجود استفاده نموده، اما این آزادی برای مدل وجود داشته باشد که با ایجاد تعداد مشخصی خط ارتباطی، توپولوژی سیستم سنتی را با حفظ ساختار شعاعی تغییر دهد. با این کار هدف ایجاد همسایگی مکمل با ریزشبکه بوجود می‌آید. بدین معنی

که ممکن است در شبکه سنتی فعلی و با خطوط تغذیه موجود، امکان ارتباط بخشی از سیستم با بخش دیگر به‌صورت مستقیم فراهم نبوده و با تبدیل سیستم به ساختار شعاعی و به دلیل تناسب ریزشبکه و همسایگی مطلوب که شرح آن آمد، نیاز به ارتباط این دو بخش ضروری باشد، بنابراین مدل پیشنهادی قادر خواهد بود با توجه به اهداف مشخص‌شده ازجمله مسافت بین دو بخش، تصمیم به احداث ارتباط موردنظر را اتخاذ نماید. الزامی وجود ندارد که این احداث ارتباط به‌عنوان مرز ریزشبکه و همسایه قرار گیرد بلکه می‌تواند با تغییر توپولوژی سیستم، شرایط ایجاد همسایگی مطلوب و یا سایر اهداف را فراهم آورد.

خروجی مدل ارائه‌شده زمانی کارا و مؤثر خواهد بود که انتخاب‌های صورت گرفته برای بازطراحی و ایجاد ریزشبکه‌ها بر اساس اهداف مناسبی انجام پذیرد به‌نحوی‌که این اهداف، عملکرد مطلوب ساختار ریزشبکه ای را تضمین نماید. در بخش سوم به معرفی این اهداف و دلایل انتخاب آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳- توابع هدف

برای اینکه مدل ارائه‌شده بتواند خروجی مطلوب را فراهم آورد باید اهداف به شکل مؤثری تعریف و سپس ارزش‌گذاری پاسخ‌های کاندید بر اساس آن‌ها انجام پذیرد. اهداف باید به نحوی باشند که منجر به عملکرد مطلوب ریزشبکه‌ها و در نهایت کل سیستم شوند.

به همین سبب در این مقاله با بررسی فضای مسئله، عملکرد مطلوب از چند منظر قابل ارزیابی می‌باشد.

۳-۱- از دیدگاه داخلی ریزشبکه

از نظر داخلی، یک ریزشبکه باید بتواند نیاز مشترکین خود را تأمین نماید. ضمن اینکه ساختار داخلی باید به نحوی باشد که توزیع بار در اطراف تولید به نحو بهینه‌ای صورت پذیرد.

الف: شاخص انرژی داخلی تأمین نشده ریزشبکه

این شاخص میزان عدم تأمین توان داخل یک ریزشبکه را مشخص می‌نماید. هرچقدر این شاخص کمتر باشد، استقلال ریزشبکه افزایش یافته و نیاز به خارج کمتر می‌شود.

$$ENS_{micro} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\alpha_{mt}(Dem_{mt}^{micro} - Gen_{mt}^{micro}) \quad (۱)$$

$$\alpha_{mt} = \begin{cases} 1 & Dem \geq Gen \\ 0 & Dem < Gen \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن ENS_{micro} انرژی تأمین نشده ریزشبکه‌ها در زمان بهره‌برداری، Gen_{mt} میزان تولید ریزشبکه mام در زمان t، Dem_{mt} میزان مصرف ریزشبکه mام در زمان t، M تعداد ریزشبکه‌ها و T زمان بهره‌برداری است.

ب: شاخص توزیع بهینه بار در ریزشبکه

این شاخص میزان توزیع بهینه بار در اطراف تولید را نمایش می‌دهد

$$Distribution_{micro} = \sqrt{\sum_{m=1}^{M}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{\beta_{mf}\, Loss_{mft}^{micro}}{Dem_{mt}^{micro}}\right)^2} \quad (۳)$$

که در آن β_{mf} ضریب از دسترس خارج شدن بخشی از ریزشبکه mام در رخداد fام، Los_{mft} میزان بار خاموش شده در زمان tام در ریزشبکه mام طی رخداد fام، Dem_{mt} میزان مصرف ریزشبکه mام در زمان tام و F تعداد رخدادهای موردمطالعه می‌باشد. در مورد β_{mf} این مقدار یک ضریب احتمالاتی (نرخ خطا) است که از روی میزان خارج شدن هر بخش از ریزشبکه در طی خطاهای مربوط به تجهیزات بکاررفته در مسیر آن بخش در طول زمان بدست می آید.

هرچقدر بارها نسبت به تولید در فضای پر ریسک تری قرار گرفته باشند، شاخص رابطه (۳) افزایش خواهد یافت. درنتیجه در یک ریزشبکه مطلوب $Distribution_{micro}$ باید کمترین حد ممکن را داشته باشد.

۳-۲- از دیدگاه خارجی ریزشبکه

از دیدگاه خارجی، همسایگان ریزشبکه باید توانایی تأمین ریزشبکه در زمان نیاز را چه از نظر میزان توان و چه از نظر ساختاری داشته باشند.

الف: شاخص انرژی خارجی تأمین نشده ریزشبکه

ازآنجایی‌که ساختار نهایی از چندین ریزشبکه و همسایگان آن‌ها تشکیل شده است، هر ریزشبکه با توجه به شرایط تولید و مصرف خود در هر ساعت نیاز به همسایگانی دارد که بتواند متناسب با آن عملکرد داشته باشد. بدین معنی که در ساعاتی که ریزشبکه دارای مصرف بالا یا تولید کم است، همسایه مطلوب دارای مصرف کم یا تولید مازاد باشد. این رخداد می‌تواند به سبب اختلاف در نوع مصرف (تفاوت زمانی مصرف خانگی و صنعتی یا ...) و یا اختلاف در نوع تولید (تفاوت زمانی تولید فتوولتاییک و بادی یا ...) و یا سایر موارد حادث شود.

شاخص $ENS_{neighbors}$ که در رابطه (۴) آمده است، می‌تواند پارامتر مناسبی جهت سنجش تناسب ریزشبکه و همسایگان باشد. هرچقدر میزان توان تأمین نشده ریزشبکه توسط همسایگان پایین باشد، تناسب بیشتری بین آن‌ها وجود خواهد داشت.

$$ENS_{neighbors} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\alpha_{mt}\left(\begin{array}{l}\alpha_{mt}(Dem_{mt}^{micro} - Gen_{mt}^{micro}) - \\ \sum_{n=1}^{N}\delta_{mtn}(Gen_{mtn}^{neighbor} - Dem_{mtn}^{neighbor})\end{array}\right) \quad (۴)$$

$$\alpha_{mt} = \begin{cases} 1 & Dem \geq Gen \\ 0 & Dem < Gen \end{cases} \qquad \delta_{mtn} = \begin{cases} 1 & Gen \geq Dem \\ 0 & Gen < Dem \end{cases} \quad (۵)$$

که در آن بالانویس $micro$ مربوط به ریزشبکه و بالانویس $neighbor$ پارامترهای مربوط به همسایگان هستند.

ب: شاخص توزیع بهینه بار در کل سیستم

از آنجایی در مواقع بحرانی کل ساختار ریزشبکه و همسایگان می‌توانند با وصل کردن خطوط اتصالشان به یکدیگر، تشکیل یک سیستم واحد

را بدهند و توزیع توان مصرف‌کنندگان را مشترکا برعهده گیرند، بهتر است ساختار کل بوجود آمده دارای توزیع بهینه باشد. شاخص $Distribution_{system}$ پارامتری است که نشان‌دهنده توزیع مطلوب در زمان اتصال ریزشبکه‌ها به یکدیگر و تشکیل ساختار واحد می‌باشد.

$$Distribution_{system} = \sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}\frac{\theta_{mf}\, Loss_{ft}^{system}}{Dem_t^{system}} \quad (۶)$$

که در آن θ_{mf} ضریب از دسترس خارج شدن بخشی از سیستم در رخداد fام، Los_{ft} میزان بار خاموش شده در زمان tام طی رخداد fام، Dem_t میزان مصرف سیستم در زمان tام و F تعداد رخدادهای مورد مطالعه می‌باشد. این شاخص نسبت به شاخص رابطه (۳) دارای توپولوژی بسیار متفاوت در شبکه و دربرگیرنده خطوط اتصال ریزشبکه‌ها به عنوان نقاط پرخطر است.

۳-۳- از دیدگاه جغرافیایی

از آنجایی که در بخشی از طرح نیاز به احداث ارتباط بین دو بخش جغرافیایی به‌صورت مستقیم می‌باشد، این احداث باید محدود و با کمترین هزینه ایجاد گردد. جهت انجام این کار، باید اطلاعات GIS گره‌های ارتباطی جدید استخراج و مسافت ناشی از آن‌ها کمینه گردد.

$$Distance = \sum_{b=1}^{B}\left\| bus_b^{recive} - bus_b^{send} \right\| \quad (۷)$$

که در آن ||...|| عملگر فاصله اقلیدسی، bus^{recive} و bus^{send} اطلاعاتی موقعیتی گره‌های ارتباطی و B تعداد ارتباط جدید بوجود آمده می‌باشد.

۴- تابع ارزشیابی

به‌منظور حل مسئله بازطراحی و پیکربندی مجدد شبکه سنتی جهت ایجاد ساختار ریزشبکه ای و با توجه به اهداف بیان‌شده در بخش سوم به فرمول‌بندی مسئله از طریق معرفی تابع ارزشیابی پرداخته می‌شود. این تابع شامل هر یک از اهداف بوده و میزان آن‌ها را به‌صورت عددی تعیین می‌کند. ازآنجایی‌که در این مسئله اهداف مختلف با واحدهای متفاوت وجود دارند، از الگوریتم‌های فازی جهت ترکیب آن‌ها بهره‌گیری می‌شود. برای این‌کار، با استفاده از بهترین و بدترین مقدار عددی هرکدام از اهداف، تابع عضویت هر هدف تشکیل و میزان عددی هر هدف در هر پاسخ ممکن، به‌وسیله این توابع عضویت سنجیده می‌شود. ازآنجایی‌که عدد تعیین‌شده توسط تابع عضویت بدون واحد است می‌توان خروجی تمام توابع عضویت‌ها را با یکدیگر ترکیب و از آن به‌عنوان مقدار عددی پاسخ استفاده نمود.

$$G_1 = ENS_{micro} \quad (۸)$$

$$G_2 = Distribution_{micro} \quad (۹)$$

$$G_3 = ENS_{neighbors} \quad (۱۰)$$

$$G_4 = Distribution_{system} \quad (۱۱)$$

$$G_5 = Distance \quad (۱۲)$$

$$\min: \quad Value = \sum_{i=1}^{5}\omega_i \mu_i(G_i) \quad (۱۳)$$

در روابط بالا، $Value$ مقدار فازی ناشی از ترکیب اهداف، G_i هدف iام، μ_i تابع عضویت فازی هدف iام و ω_i ضرایب تأثیر اهداف هستند.

۵- روش بهینه‌سازی

با توجه به نوع مسئله مطرح‌شده در این مقاله، الگوریتم‌های جستجوی تصادفی می‌توانند کارایی مطلوبی در یافتن پاسخ بهینه مدل داشته باشند. این الگوریتم‌ها به‌صورت هوشمند در محیط جواب به سمت پاسخ بهینه حرکت می‌کنند. هرچه قدر دقت پاسخ نهایی بیشتر باشد الگوریتم دارای ارجحیت و ارزش بالاتری خواهد بود. در این مقاله از سه الگوریتم کرم شب‌تاب (FA)، گرگ‌های خاکستری (GWO) و ازدحام ذرات (PSO) برای مطالعه مدل ارائه‌شده بهره‌گیری شده و کارایی هر یک موردبررسی قرار گرفته است. در تمامی این روش‌ها ابتدا جواب‌های ممکن کدگذاری می‌شوند. هرچقدر این کدگذاری هوشمندانه‌تر انجام گیرد دقت و سرعت همگرایی روش افزایش می‌یابد. الگوریتم کرم شب‌تاب، الگوریتم فرا ابتکاری است که با الهام از رفتار ساطع کردن نور کرم‌های شب‌تاب بدست آمده است. هدف اولیه کرم شب‌تاب از ساطع کردن نور به‌مانند یک سیستم علامت‌دهی برای جذب کرم‌های شب‌تاب دیگر است [۴۲].

کرم‌های شب‌تاب نورهایی تولید می‌کنند که الگوی نوری هرکدام با دیگری متفاوت است. آن‌ها به‌منظور جذب جفت و شکار از این نور استفاده می‌کنند. میزان این نور رابطه مستقیمی با جذابیت کرم شب‌تاب دارد. با در نظر گرفتن میزان نور هر کرم به‌عنوان تابع هدف، می‌توان رفتار کرم‌های شب‌تاب را به‌صورت یک الگوریتم بهینه‌سازی مدل نمود.

برای راحتی شبیه‌سازی زندگی کرم‌های شب‌تاب، در فرایند مدل‌سازی سه فرض اساسی در نظر گرفته شده است.

۱) کرم‌های شب‌تاب همگی تک جنسیتی هستند، بنابراین جنسیت نقشی در جذب آن‌ها به سمت یکدیگر ندارد.

۲) میزان جذب بین دو کرم شب‌تاب با درخشندگی آن‌ها نسبت مستقیم و با فاصله بین آن‌ها نسبت عکس دارد. بنابراین کرم‌های شب‌تاب درخشنده‌تر سایر کرم‌های شب‌تاب را که در همسایگی‌اش است، به سمت خود جذب می‌کند و اگر هیچ‌کدام درخشان‌تر از دیگری نبودند حرکت آن‌ها به‌صورت تصادفی انجام می‌شود.

۳) میزان درخشندگی کرم‌های شب‌تاب بر اساس مقدار تابع هدف مربوط به آن‌ها تعیین می‌گردد.

همان‌طور که بیان گردید میزان جذابیت کرم‌های شب‌تاب (β) نسبی بوده و به فاصله بین دو کرم شب‌تاب (r) و ضریب جذب نور (γ) بستگی دارد که از رابطه (۱۴) قابل‌محاسبه است.

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (۱۴)$$

در رابطه (۱۴)، β_0 میزان جذابیت کرم درخشان‌تر در $r=0$ است. موقعیت کرم iام پس از حرکت به سمت کرم jام که درخشان‌تر است، از رابطه (۱۵) محاسبه می‌گردد.

$$x_i^n = x_i^{n-1} + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}\left(x_j^{n-1} - x_i^{n-1}\right) + a e_i^{n-1} \quad (۱۵)$$

$$r_{ij} = \left\| x_i - x_j \right\| \quad (۱۶)$$

که در آن x_i موقعیت کرم شب‌تاب کم‌نورتر، x_j موقعیت کرم شب‌تاب درخشان‌تر، n شماره تکرار، a عدد تصادفی و e_i یک بردار از اعداد تصادفی است که می‌تواند دارای توزیع یکنواخت یا گوسی باشد. قسمت سوم رابطه (۱۵) ترم تصادفی رابطه محسوب می‌شود که باعث جلوگیری از رسیدن به بهینه محلی و جستجوی جامع‌تر فضای مسئله می‌شود [۴۳].

الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری از ساختار سلسله مراتبی جایگاه گرگ‌ها در گروه و همچنین ساختار و وظایف آن‌ها در شکار الهام گرفته شده است. گرگ‌های خاکستری که در بالاترین جایگاه زنجیره غذایی قرار دارند، غالباً به‌صورت گروهی زندگی می‌کنند بلندمرتبه‌ترین گرگ گروه، گرگ آلفا نامیده می‌شود که مسئولیت شکار، تعیین زمان خواب، زمان بیدار شدن، مکان اسکان و سایر فعالیت‌های گروه را به عهده دارد. سایر گرگ‌ها از گرگ آلفا و تصمیمات او اطاعت می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر گرگ آلفا عهده‌دار رهبری گروه است. پس از گرگ آلفا، گرگ بتا بالاترین رده را در گروه در اختیار دارد. گرگ بتا در حقیقت مشاور گرگ آلفا در تصمیم‌گیری است اما از دستورات گرگ آلفا پیروی می‌کند. همچنین گرگ بتا کاندیدای جایگزینی گرگ آلفا در صورت پیر شدن و یا مرگ گرگ آلفا، می‌باشد. پست‌ترین جایگاه در گروه متعلق به گرگ‌های امگا است [۴۴]. گاهاً مشاهده شده است که آن‌ها وظیفه مواظبت از توله‌ها را بر عهده دارند. گروه دیگر، گرگ‌های دلتا هستند که جایگاهی پایین‌تر از گرگ بتا و بالاتر از گرگ‌های امگا دارند. نگهبانی، مواظبت از گرگ‌های پیر و شکار از وظایف آن‌ها است. این ساختار سلسله مراتبی و همچنین تعامل گروهی آن‌ها در شکار، بسیار قابل‌توجه است به‌نحوی‌که مدل‌سازی ریاضی این فرایند منجر به ابداع الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری شده است [۴۵].

مطابق مطالعات صورت گرفته مراحل اصلی شکار گرگ‌های خاکستری شامل ۳ فاز اصلی است:

۱) مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب آن
۲) نزدیک شدن، احاطه کردن (حلقه زدن) به دور شکار و گمراه کردن آن تا زمانی که از حرکت باز بماند.
۳) حمله به شکار

بهینه‌سازی با استفاده از گرگ‌های دلتا، آلفا و بتا انجام می‌شود. یک گرگ آلفا به‌عنوان هدایت‌کننده اصلی الگوریتم فرض می‌شود و یک گرگ بتا و دلتا نیز مشارکت دارند و بقیه گرگ‌ها به‌عنوان دنبال کننده آن‌ها محسوب می‌شوند [۴۶].

گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا نشان‌دهنده بهترین پاسخ‌ها بوده و در تعیین گرگ‌های امگا توسط روابط (۱۷) تا (۲۵) مشارکت خواهند داشت.

$$D_\alpha = \left| C_1 . x_\alpha^{n-1} - A_1 . x^{n-1} \right| \quad (۱۷)$$

$$X_1 = x_\alpha^{n-1} - A_1 . D_\alpha \quad (۱۸)$$

$$D_\beta = \left| C_2 . x_\beta^{n-1} - A_2 . x^{n-1} \right| \quad (۱۹)$$

$$X_2 = x_\alpha^{n-1} - A_2 . D_\beta \quad (۲۰)$$

$$D_\delta = \left| C_3 . x_\delta^{n-1} - A_3 . x^{n-1} \right| \quad (۲۱)$$

$$X_3 = x_\delta^{n-1} - A3 . D_\delta \quad (۲۲)$$

$$A_i = 2.a.r_1 - a \quad (۲۳)$$

$$C_i = 2.r_2 \quad (۲۴)$$

$$x^{n-1} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (۲۵)$$

که در این روابط x^{n-1} پاسخ اولیه، x^n پاسخ جدید، a پارامتر کنترلی متغیر بین صفر تا دو در تمامی تکرارها و r_1 و r_2 اعداد تصادفی یکنواخت بین صفر تا یک هستند.

الگوریتم ازدحام ذرات، یک الگوریتم محاسبه‌ای تکاملی الهام گرفته از طبیعت و براساس تکرار می‌باشد. منبع الهام این الگوریتم، رفتار اجتماعی حیوانات، همانند حرکت دسته‌جمعی پرندگان و ماهی‌ها است. PSO با یک ماتریس جمعیت تصادفی اولیه شروع می‌شود و هر عنصر جمعیت، یک ذره نامیده می‌شود. درواقع الگوریتم PSO از تعداد مشخصی از ذرات تشکیل می‌شود که به‌طور تصادفی، مقدار اولیه می‌گیرند. برای هر ذره دو مقدار وضعیت و سرعت، تعریف می‌شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت، مدل می‌شوند. این ذرات، به‌صورت تکرارشونده‌ای در فضای n بعدی مسئله حرکت می‌کنند تا با محاسبه مقدار بهینگی به‌عنوان یک ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن جدید را جستجو کنند. بُعد فضای مسئله، برابر تعداد پارامترهای موجود در تابع موردنظر برای بهینه‌سازی می‌باشد. یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت هر ذره در گذشته و یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت پیش‌آمده در میان همه ذرات، اختصاص می‌یابد. با تجربه حاصل از این حافظه‌ها، ذرات تصمیم می‌گیرند که در نوبت بعدی چگونه حرکت کنند. در هر بار تکرار، همه ذرات در فضای n بعدی مسئله حرکت می‌کنند تا بالاخره نقطب بهینه عام پیدا شود. ذرات، سرعت‌هایشان و موقعیت‌شان را بر حسب بهترین جواب‌های مطلق و محلی مطابق روابط (۲۶) تا (۲۷) به‌روز می‌کنند.

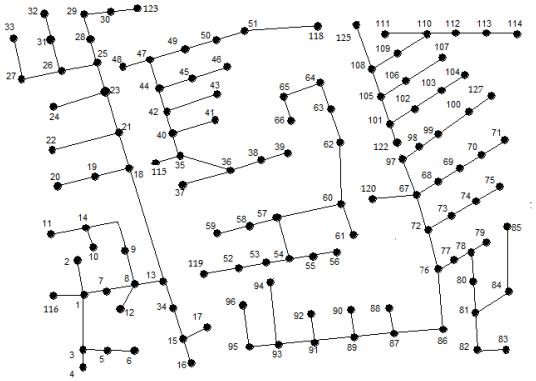
$$x_i^n = x_i^{n-1} + V_i^n \quad (۲۶)$$

$$V_i^n = c_1\left(x_i^{localbest} - x_i^{n-1}\right) + c_2\left(x^{globalbest} - x_i^{n-1}\right) + wV_i^{n-1} \quad (۲۷)$$

که در آن x^n موقعیت جدید ذره، $x^{localbest}$ بهترین موقعیت محلی و $x^{globalbest}$ بهترین موقعیت مطلق می‌باشد.

۶- شبیه‌سازی و نتایج

به‌منظور بررسی و اعتباربخشی به مسئله ارائه‌شده در این مقاله، از شبکه ۱۲۳ باسه IEEE به‌عنوان شبکه تست سنتی فعلی استفاده می‌شود. شکل (۱) نمای این شبکه را نمایش می‌دهد [۴۷]. بازه اجرای طرح، برنامه ای ده ساله در نظر گرفته شده که علاوه بر تغییرات فصلی بار، رشد سالیانه نیز در آن لحاظ گردیده است.



شکل (۱): شبکه تست نمونه ۱۲۳ باسه IEEE [۴۵]

این شبکه دارای ۵ فیدر اصلی بوده که هر فیدر بخشی از بار را به‌صورت شعاعی تغذیه می‌نماید. حداکثر بار شبکه طی ده سال اجرای طرح، مطابق جدول (۱) پیوست و میزان آن در طی فصول مختلف در سال های اول تا دهم، مطابق ضرایب جدول (۲) پیوست نسبت به بار حداکثر می باشد. تولیدپراکنده در باس‌های ۲، ۳۹، ۶۶، ۹۶ و ۱۱۰ با ظرفیت حداکثر ۱۰۵۰ کیلووات برای هر واحد بوده که طی مدت ده سال به مرور وارد مدار خواهد شد. مقدار تولید در دسترس در سال های مختلف و برای فصول متفاوت مطابق ضرایب جدول (۲) خواهد بود .

برای ایجاد ساختار ریزشبکه ای، حداکثر ایجاد ارتباط ۴ مسیر و حداکثر تعداد ریزشبکه ۵ عدد در نظر گرفته می‌شود. جهت ساده‌سازی مسئله، ضرایب از دسترس خارج شدن تجهیزات تنها برای خرابی کابل‌ها منظور شده و مقدار آن ۰/۰۳۵ مطابق مرجع [۴۸] می‌باشد. اطلاعات GIS باس‌ها مطابق جدول (۱) پیوست خواهد بود.

در ادامه و به‌منظور تعیین محدوده هر ریزشبکه در ساختار جدید به همراه توپولوژی جدید ایجادشده، بنا بر اهداف تعریفی، از چند سناریو استفاده می‌شود.

الف: سناریو اول: پیکربندی سیستم ازنظر خودکفایی تأمین هر ریزشبکه

در این سناریو انتخاب محدوده هر ریزشبکه تنها بر اساس وضعیت تأمین بار با تولیدات داخلی صورت پذیرفته است. با اجرای برنامه شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های PSO، FA و GWO در ترکیب با الگوریتم فازی نتایج به‌صورت جدول (۱) می‌باشد.

جدول (۱): مقادیر خروجی الگوریتم‌های سه‌گانه در سناریو اول

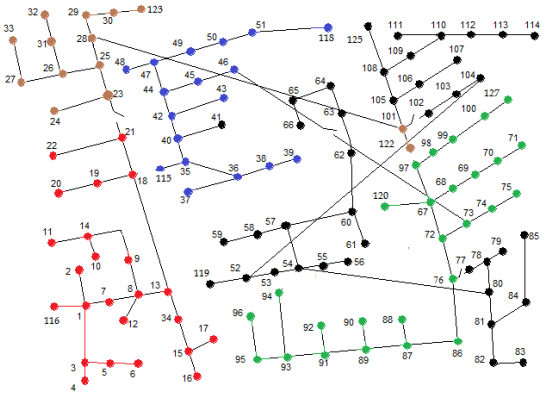
Algorithm	GWO	PSO	FA
ENS_{micro}	949.5	2110	5169.5

در این شبیه‌سازی، طبق نتایج، الگوریتم گرگ خاکستری عملکرد بسیار بهتری در کاهش انرژی تامین‌نشده ریزشبکه‌ها دارد. ساختار ریزشبکه ای خروجی الگوریتم GWO در جدول (۲) نشان داده شده است. در این جدول مرزهای ریزشبکه، محل جدایی ریزشبکه و همسایگان است و ارتباط‌های جدید مسیرهایی هستند که به ایجاد توپولوژی جدید سیستم با توجه به اهداف تعیین‌شده کمک می‌نمایند.

جدول (۲): توپولوژی جدید سیستم در سناریو اول

ارتباط‌های جدید	مرز ریزشبکه‌ها	تعداد ریزشبکه	الگوریتم
۱۰۱-۲۸	۲۳-۲۱	۵	GWO
۷۳-۴۶	۷۳-۴۶		
۸۰-۵۴	۷۷-۷۶		
۱۰۴-۵۲	۱۰۲-۱۰۱		

نمایش تصویری این اطلاعات در شکل (۲) نشان داده شده است. توجه شود در این سناریو طول خطوط جدید مدنظر قرار نگرفته است.



شکل (۲): نمایش پیکربندی مجدد سیستم حاصل از سناریو اول

ب: سناریو دوم: پیکربندی سیستم از نظر توزیع بهینه بار در هر ریزشبکه

در این سناریو، ساختار هر ریزشبکه موردنظر می‌باشد. هرچقدر مسیر بارها تا تولید از قابلیت‌اطمینان بیشتری برخوردار باشد، امکان خاموشی ناخواسته بر اثر خطا کاهش می‌یابد. توزیع بهینه بار در هر ریزشبکه هدف این سناریو است. با اجرای برنامه شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های PSO، FA و GWO در ترکیب با الگوریتم فازی نتایج به‌صورت جدول (۳) می‌باشد.

جدول (۳): مقادیر خروجی الگوریتم‌های سه‌گانه در سناریو دوم

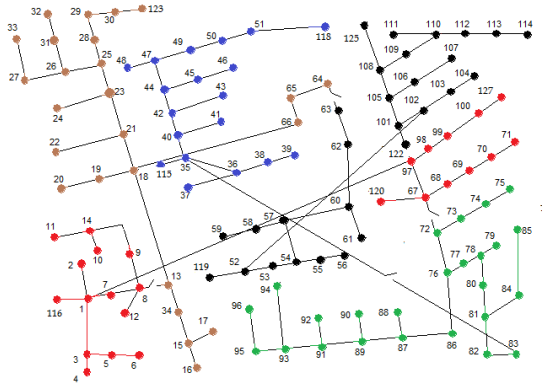
Algorithm	GWO	PSO	FA
$Distribution_{micro}$	450.77	674.98	802.69

در این شبیه‌سازی الگوریتم گرگ خاکستری از دقت بیشتری در پاسخ نهایی برخوردار است. خروجی این الگوریتم در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۴): توپولوژی جدید سیستم در سناریو دوم

ارتباط‌های جدید	مرز ریزشبکه‌ها	تعداد ریزشبکه	الگوریتم
۹۷-۱	۱۳-۸	۵	GWO
۶۶-۱۸	۶۴-۶۳		
۱۰۲-۵۲	۷۲-۶۷		
۸۳-۳۵	۸۳-۳۵		

نمایش تصویری این اطلاعات در شکل (۳) نشان داده شده است. توجه شود در این سناریو طول خطوط جدید مدنظر قرار نگرفته است.



شکل (۳): نمایش پیکربندی مجدد سیستم حاصل از سناریو دوم

ج: سناریو سوم: پیکربندی سیستم از نظر توزیع بهینه بار در کل سیستم

درصورتی‌که بجای توزیع بهینه بار در هر ریزشبکه، توزیع بار در کل سیستم شامل ریزشبکه و همسایگان هدف‌گذاری شود، با اجرای الگوریتم‌های سه‌گانه نتایج جدول (۵) بدست می‌آید. این هدف در زمان‌های بحرانی کمک بسزایی به سیستم در تأمین بار می‌نماید. به‌طوری‌که ریزشبکه‌ها بااتصال مسیرهای کمکی خود به یکدیگر، ساختار واحد و نیرومندی را تشکیل خواهند داد.

جدول (۵): مقادیر خروجی الگوریتم‌های سه‌گانه در سناریو سوم

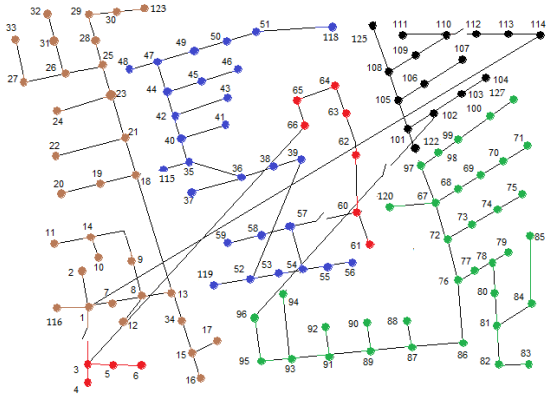
Algorithm	GWO	PSO	FA
$Distribution_{system}$	9.59	19.17	48.89

همچون رویه پیشین، الگوریتم گرگ خاکستری با مقدار شاخص ۹.۵۹ بیشترین دقت را در خروجی خود دارا می‌باشد. پیکربندی حاصل از این شبیه‌سازی به‌صورت جدول (۶) است.

جدول (۶): توپولوژی جدید سیستم در سناریو سوم

ارتباط‌های جدید	مرز ریزشبکه‌ها	تعداد ریزشبکه	الگوریتم
۱۱۴-۱	۳-۱	۵	GWO
۶۶-۳	۶۰-۵۷		
۱۰۲-۹۶	۱۰۲-۹۶		
۵۲-۳۹	۱۱۲-۱۱۰		

نمایش تصویری این اطلاعات در شکل (۴) نشان داده شده است. توجه شود در این سناریو طول خطوط جدید مدنظر قرار نگرفته است.



شکل (۴): نمایش پیکربندی مجدد سیستم حاصل از سناریو سوم

د: سناریو نهایی پیشنهادی: پیکربندی سیستم از نظر خودکفایی تأمین هر ریزشبکه، توزیع بهینه بار در هر ریزشبکه و در کل سیستم و تناسب ریزشبکه و همسایگان با ملاحظات جغرافیایی

هرکدام از اهداف بیان‌شده در بخش سوم نظیر توانایی تأمین مصارف داخلی توسط تولیدات ریزشبکه، توانایی کمک‌رسانی همسایگان و تناسب ریزشبکه و همسایه، توزیع بهینه بار در سطح ریزشبکه و کل سیستم و ملاحظات جغرافیایی درصورتی‌که با یکدیگر ترکیب شوند، پاسخ جامعی را برای ساختار ریزشبکه ای بوجود می‌آورند و درنتیجه عملکرد مطلوب سیستم تضمین می‌گردد. با اجرای این اهداف و شبیه‌سازی مدل بدست آمده، با استفاده از الگوریتم PSO، GWO و FA نتایج به‌صورت جدول (۷) خواهد بود.

جدول (۷): مقادیر خروجی الگوریتم‌های سه‌گانه در سناریو نهایی

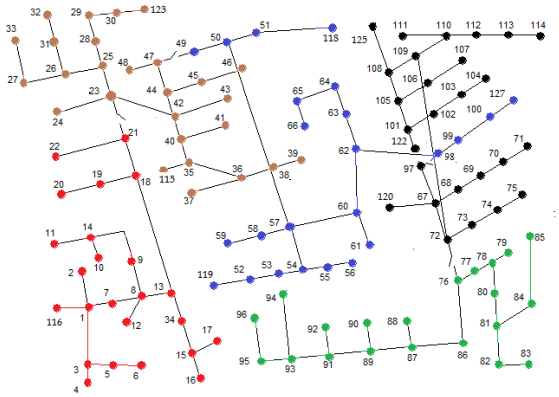
Algorithm	GWO	PSO	FA
ENS_{micro}	0	1371.5	8180
$Distribution_{micro}$	480	700.94	1383
$ENS_{neighbors}$	0	0	0
$Distribution_{system}$	105.53	89.26	52.63
Distance	332	434	511.83
Fuzzy Fitness	0.019	0.0367	0.1237

همچون سه سناریوی پیشین، مجدداً الگوریتم گرگ خاکستری در ترکیب با الگوریتم فازی دقت بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها بدست می‌دهد که اطلاعات مربوط به پیکربندی و طراحی ریزشبکه و همسایگان بر اساس آن در جدول (۷) آمده است.

جدول (۷): توپولوژی جدید سیستم در سناریو پیشنهادی

ارتباط‌های جدید	مرز ریزشبکه‌ها	تعداد ریزشبکه	الگوریتم
۴۲-۲۳	۴۹-۴۷	۵	GWO
۵۷-۵۰	۲۳-۲۱		
۹۸-۶۲	۷۶-۷۲		
۱۰۹-۷۲	۹۸-۹۷		

نمایش تصویری این اطلاعات در شکل (۵) نشان داده شده است. در این سناریو، طول خطوط جدید نیز بر طبق هدف پنجم (G_5) موردتوجه قرار گرفته، که از روی شکل نیز، تفاوت توپولوژی نسبت به سایر نقشه های گرافیکی (۲) تا (۴) مشخص است.



شکل (۵): نمایش پیکربندی مجدد سیستم حاصل از سناریو پیشنهادی

۷- نتیجه‌گیری

پیوستن تولیدات کوچک و ذخیره‌ای انرژی به سیستم‌های ولتاژ پایین و متوسط، نوع جدیدی از سیستم قدرت بنام ریزشبکه را تشکیل می‌دهند. این سیستم‌ها قادرند با تجمیع و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر و سایر منابع تولید توان محلی، نیاز مشترکین خود را تأمین و یا در صورت نیاز از شبکه‌های بالادست کمبود توان خود را جبران نمایند.

با توجه به مطالعات فراوان در حوزه بهره‌برداری و اثبات کارایی ریزشبکه، نیاز به پژوهش در حوزه طراحی جهت ایجاد ساختار و بستر مناسب بیش‌ازپیش ملاحظه می‌گردد.

به همین منظور، در این مقاله، با مطالعه و تعریف اهداف مناسب، که عملکرد مطلوب ریزشبکه را تضمین نمایند، به پیکربندی و بازطراحی شبکه سنتی جهت تبدیل به ساختار نوین ریزشبکه ای پرداخته شده است. دو رویکرد اساسی در این مقاله وجود داشته که شامل حفظ حداکثری شبکه سنتی پیشین به دلایل اقتصادی و ایجاد تغییرات حداقلی برای تأمین نیاز ریزشبکه به دلایل فنی می‌باشد. با ارائه مدل پیشنهادی که دربرگیرنده ملاحظات جغرافیایی، فنی و اقتصادی است و شبیه‌سازی آن با استفاده از الگوریتم‌های کرم شب‌تاب، گرگ‌های خاکستری و ازدحام ذرات، نتایج قابل‌توجهی بدست آمده که کارایی سیستم را بهبود می‌بخشد.

مراجع

[1] A. Khorsandi, "An Algorithm to Control Interlinking Converter in a Hybrid Microgrid", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers ,Vol. 21, No. 4, PP. 1-14, 2024.

[2] H. Fontenot and B. Dong, "Modeling and control of building-integrated microgrids for optimal energy management—A review", Appl. Energy, vol. 254, Nov. 2019.

[3] M. F. Roslan, M. A. Hannan, P. Jern and M. N. Uddin, "Microgrid control methods toward achieving sustainable energy management", Appl. Energy, vol. 240, pp. 583-607, Apr. 2019.

[4] S. Ali, Z. Zheng, M. Aillerie, J. P. Sawicki, M. C. Pera and D. Hissel, "A review of DC microgrid energy management systems dedicated to residential applications", Energies, vol. 14, no. 14, pp. 1-26, 2021.

[5] M. A. Jirdehi, V. S. Tabar, S. Ghassemzadeh and S. Tohidi, "Different aspects of microgrid management: A comprehensive review", J. Energy Storage, vol. 30, Aug. 2020.

[6] M. F. Zia, E. Elbouchikhi and M. Benbouzid, "Microgrids energy management systems: A critical review on methods solutions and prospects", Appl. Energy, vol. 222, pp. 1033-1055, Jul. 2018.

[7] L. Meng, E. R. Sanseverino, A. Luna, T. Dragicevic, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, "Microgrid supervisory controllers and energy management systems: A literature review", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 60, pp. 1263-1273, Jul. 2016.

[8] A. Elmouatamid, R. Ouladsine, M. Bakhouya, N. El Kamoun, M. Khaidar and K. Zine-Dine, "Review of control and energy management approaches in micro-grid systems", Energies, vol. 14, no. 1, pp. 168, Dec. 2020.

[9] Y. E. García Vera, R. Dufo-López and J. L. Bernal-Agustín, "Energy management in microgrids with renewable energy sources: A literature review", Appl. Sci., vol. 9, no. 18, pp. 3854, Sep. 2019.

[10] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei and S. Bahramirad, "State of the art in research on microgrids: A review", IEEE Access, vol. 3, pp. 890-925, 2015.

[11] S. Sahoo, S. Mishra, S. Jha and B. Singh, "A cooperative adaptive droop based energy management and optimal voltage regulation scheme for DC microgrids", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 67, no. 4, pp. 2894-2904, Apr. 2020.

[12] K. A. Khan and M. Khalid, "Improving the transient response of hybrid energy storage system for voltage stability in DC microgrids using an autonomous control strategy", IEEE Access, vol. 9, pp. 10460-10472, 2021.

[13] M. Nabatirad, R. Razzaghi and B. Bahrani, "Decentralized voltage regulation and energy management of integrated DC microgrids into AC power systems", IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 9, no. 2, pp. 1269-1279, Apr. 2021.

[14] H. Hajebrahimim, S. M. Kaviri, S. Eren and A. Bakhshai, "A new energy management control method for energy storage systems in microgrids", IEEE Trans. Power Electron., vol. 35, no. 11, pp. 11612-11624, Mar. 2020.

[15] B. Benlahbib, N. Bouarroudj, S. Mekhilef, D. Abdeldjalil, T. Abdelkrim, F. Bouchafaa, et al., "Experimental investigation of power management and control of a PV/wind/fuel cell/battery hybrid energy system microgrid", Int. J. Hydrogen Energy, vol. 45, no. 53, pp. 29110-29122, Oct. 2020.

[16] S. Shubhra and B. Singh, "Three-phase grid-interactive solar PV-battery microgrid control based on normalized gradient adaptive regularization factor neural filter", IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 16, no. 4, pp. 2301-2314, Apr. 2020.

[17] X. Wang, J. Zhang, M. Zheng and L. Ma, "A distributed reactive power sharing approach in microgrid with improved droop control", CSEE J. Power Energy Syst., vol. 7, no. 6, pp. 1238-1246, Nov. 2021.

[18] M. A. Hassan, M. Y. Worku and M. A. Abido, "Optimal power control of inverter-based distributed generations in

[19] W. Gil-González, O. D. Montoya and A. Garces, "Direct power control of electrical energy storage systems: A passivity-based PI approach", Electr. Power Syst. Res., vol. 175, Oct. 2019.

[20] M. Sorouri, M. R. Shakarami and J. Soltani, "Autonomous active power control for an islanded AC microgrid using improved bus signaling method", Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 113, pp. 549-563, Dec. 2019.

[21] P. Liu, Y. Wang, J. Li and D. Liu, "Advanced sensorless power control strategy of renewable microgrids for reliability enhancement", Appl. Energy, vol. 255, Dec. 2019.

[22] F. Zheng, X. Lin, Y. Lin, Y. Zhang and Y. Zhang, "Design of a novel hybrid control strategy for ES grid-connected inverter for smooth microgrid transition operation", IEEE Access, vol. 7, pp. 171950-171965, 2019.

[23] S. Chandak, P. Bhowmik and P. K. Rout, "Dual-stage cascaded control to resynchronise an isolated microgrid with the utility", IET Renew. Power Gener., vol. 14, no. 5, pp. 871-880, Apr. 2020.

[24] B. E. Sedhom, M. M. El-Saadawi, A. Y. Hatata and E. E. Abd-Raboh, "H-infinity versus model predictive control methods for seamless transition between islanded- and grid-connected modes of microgrids", IET Renew. Power Gener., vol. 14, no. 5, pp. 856-870, Apr. 2020.

[25] Y. Li, L. Fu, K. Meng, Z. Y. Dong, K. Muttaqi and W. Du, "Autonomous control strategy for microgrid operating modes smooth transition", IEEE Access, vol. 8, pp. 142159-142172, 2020.

[26] M. Ganjian-Aboukheili, M. Shahabi, Q. Shafiee and J. M. Guerrero, "Seamless transition of microgrids operation from grid-connected to islanded mode", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 11, no. 3, pp. 2106-2114, May 2020.

[27] J. Chen, S. Hou and J. Chen, "Seamless mode transfer control for master-slave microgrid", IET Power Electron., vol. 12, no. 12, pp. 3158-3165, Oct. 2019.

[28] S. D'silva, M. Shadmand, S. Bayhan and H. Abu-Rub, "Towards grid of microgrids: Seamless transition between grid-connected and islanded modes of operation", IEEE Open J. Ind. Electron. Soc., vol. 1, pp. 66-81, 2020

[29] A. Dagar, P. Gupta, V. Niranjan, "Microgrid protection: A comprehensive review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 149, 2021.

[30] W. M. Hamanah, M. I. Hossain, M. Shafiullah and M. A. Abido, "AC Microgrid Protection Schemes: A Comprehensive Review", in IEEE Access, Vol. 11, pp. 76842-76868, 2023

[31] A. N. Sheta, G. M. Abdulsalam, B. E. Sedhom and A. A. Eladl, "Comparative framework for AC-microgrid protection schemes: challenges, solutions, real applications, and future trends", in Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 8, no. 2, pp. 1-40, April 2023

[32] J. de la Cruz, Y. Wu, J. E. Candelo-Becerra, J. C. Vásquez and J. M. Guerrero, "Review of Networked Microgrid Protection: Architectures, Challenges, Solutions, and Future Trends", in CSEE Journal of Power and Energy Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 448-467, March 2024

[33] G.P. Santos, A. Tsutsumi, J.C.M. Vieira, "Enhanced voltage relay for AC microgrid protection", Electric Power Systems Research, Vol. 220, 2023

[34] J.D. Fonseca, J.M. Commenge, M. Camargo, L. Falk, I.D. Gil, "Sustainability analysis for the design of distributed energy systems: A multi-objective optimization approach", Applied Energy, Vol. 290, 2021.

[35] Y.C. Tsao, V.V Thanh "Toward blockchain-based renewable energy microgrid design considering default risk and demand uncertainty", Renewable Energy, Vol. 163, 2021

[36] Y.C. Tsao, V.V. Thanh, Q. Wu, "Sustainable microgrid design considering blockchain technology for real-time price-based demand response programs", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 125, 2021

[37] M. Kharrich, O. H. Mohammed, N. Alshammari, M. Akherraz, "Multi-objective optimization and the effect of the economic factors on the design of the microgrid hybrid system", Sustainable Cities and Society, Vol. 65, 2021.

[38] V. F. Yu, T. H. A. Le, J. N.D. Gupta, "Sustainable microgrid design with peer-to-peer energy trading involving government subsidies and uncertainties", Renewable Energy, Vol. 206, 2023.

[39] S. A. Arefifar, Y. A. -R. I. Mohamed and T. H. M. El-Fouly, "Supply-Adequacy-Based Optimal Construction of Microgrids in Smart Distribution Systems", in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 3, pp. 1491-1502, Sept. 2012.

[40] S. A. Arefifar, Y. A. . -R. I. Mohamed and T. H. M. EL-Fouly, "Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply-Security", in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 3, pp. 1567-1575, Sept. 2013.

[41] S. A. Arefifar and Y. A. -R. I. Mohamed, "DG Mix, Reactive Sources and Energy Storage Units for Optimizing Microgrid Reliability and Supply Security", in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 1835-1844, July 2014.

[42] H. Akbari Fard, O. Sattari, A. Ghaseminejad, and M. Rezaei Jafari, "Application of the cuckoo algorithm and firefly algorithm in simulation and forecasting of money demand in Iran up to the 2025 horizon," vol. 15, no. 4, 2018.

[43] S. M. Hosseini Moghari and M. E. Bani-Habib, "Optimization of reservoir operation for agricultural water supply using the firefly algorithm," Journal of Water and Soil Resources Conservation, vol. 3, no. 4, 2014.

[44] S. Ahmadi, H. Pourroshanfekr Arabani, D. Ashtiani Haghighi, J. M. Guerrero, Y. Ashgevari, A. Akbarimajd, "Multi Objective Optimal location of Phasor Measuring Units Considering the Limitation of the Number Measuring Channel and the Effect of Zero Injection Bus and Transformers", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 18, No. 2 ,PP. 9-21, 2021.

[45] I. Behravan, S.H. Zahiri, S.M. Razavi; R. Trasarti, "Using Grey Wolf Optimization Algorithm in Big Data Clustering", Tabriz Journal of Electrical Engineering, Vol. 50, No. 1, spring 2020.

[46] S. Emami, Y. Choopan, F. Salmasi, "Presentation of a Method Based on Gray Wolf Optimizer and Imperialist Competitive Algorithms in Optimal Operation of Dam Reservoir", Amirkabir Journal. Civil Eng., Vol. 52, pp 1-4, 2020.

[47] K. P. Schneider, B. A. Mather, B. C. Pal, C. W. Ten, G. J. Shirek, H. Zhu, J. C. Fuller, J. L. R. Pereira, L. F. Ochoa, grid-connected microgrid", Sustainability, vol. 11, no. 20, pp. 5828, Oct. 2019.

L. R. de Araujo, R. C. Dugan, S. Matthias, S. Paudyal, T. E. McDermott, and W Kersting, "Analytic Considerations and Design Basis for the IEEE Distribution Test Feeders", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 3, pp. 3181-3188, 2018.

[48] M. Tourani, M. R. Aghaebrahimi, and H. R. Najafi, "Parking lot scheduling of electric vehicles and their charge/discharge management to improve reliability in smart grids," Tabriz University Journal of Electrical Engineering, vol. 47, no. 2, Summer 2017.

پیوست‌ها

جدول (پ-۱) پیوست: اطلاعات فنی و جغرافیایی باس بارها شبکه ۱۲۳ باسه IEEE

Bus	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Load	32	0	24	132	16	60	16	40	32	16
x	160	155	160	165	190	220	190	225	210	175
y	110	150	40	20	40	40	115	120	165	**165**
Bus	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
Load	32	16	56	24	32	16	20	36	32	32
x	120	200	260	165	280	290	310	220	180	130
y	180	90	125	190	55	25	70	260	250	**240**
Bus	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**
Load	44	60	76	20	24	36	32	32	32	36
x	210	125	190	125	180	135	90	170	165	195
y	305	285	355	335	390	380	370	415	445	**450**
Bus	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**	**37**	**38**	**39**	**40**
Load	36	24	32	24	32	24	32	40	0	40
x	125	115	80	270	280	340	280	375	410	270
y	415	445	415	90	275	260	240	270	280	**300**
Bus	**41**	**42**	**43**	**44**	**45**	**46**	**47**	**48**	**49**	**50**
Load	32	16	24	32	16	16	28	56	28	76
x	320	260	320	250	295	335	240	210	285	320
y	330	330	350	360	370	385	390	385	405	**415**
Bus	**51**	**52**	**53**	**54**	**55**	**56**	**57**	**58**	**59**	**60**
Load	16	32	32	20	16	68	44	40	32	16
x	355	350	380	410	440	470	395	360	320	470
y	425	140	150	150	155	160	205	190	185	220
Bus	**61**	**62**	**63**	**64**	**65**	**66**	**67**	**68**	**69**	**70**
Load	32	24	32	40	28	0	32	16	32	16
x	490	470	460	450	405	410	565	590	615	640
y	180	290	330	365	350	320	230	245	265	275
Bus	**71**	**72**	**73**	**74**	**75**	**76**	**77**	**78**	**79**	**80**
Load	32	24	40	32	32	84	32	24	32	32
x	670	580	605	635	240	590	610	630	645	630
y	295	190	205	225	-175	140	150	160	175	125
Bus	**81**	**82**	**83**	**84**	**85**	**86**	**87**	**88**	**89**	**90**
Load	16	32	28	28	28	32	16	32	32	40
x	635	635	670	675	675	595	535	530	490	485
y	90	40	40	115	195	65	60	95	60	90
Bus	**91**	**92**	**93**	**94**	**95**	**96**	**97**	**98**	**99**	**100**
Load	40	20	28	32	40	0	20	32	32	56
x	440	440	395	385	360	355	545	565	590	625
y	45	85	50	125	50	95	270	290	300	330
Bus	**101**	**102**	**103**	**104**	**105**	**106**	**107**	**108**	**109**	**110**
Load	64	24	40	40	20	32	24	24	32	0
x	530	560	595	620	520	550	595	510	540	575
y	315	330	355	375	345	365	395	390	400	420
Bus	**111**	**112**	**113**	**114**	**115**	**116**	**117**	**118**	**119**	**120**
Load	16	16	32	16	20	40	24	24	32	56
x	525	610	650	685	250	125	65	440	310	510
y	420	420	420	420	270	110	110	435	130	225
Bus	**121**	**122**	**123**	**124**	**125**	**126**	**127**	**128**	**129**	
Load	64	20	28	32	32	24	24	20	0	
x	365	540	230	230	495	510	655	680	535	
y	15	290	455	430	435	450	350	370	190	

جدول (پ-۲) پیوست: اطلاعات ضرایب تولید و مصرف نسبت به مقادیر حداکثر در فصول مختلف ده ساله با درنظر گرفتن رشد بار

Year 1				Year 2				Year 3			
Spring	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**
0.05	0.1	0.07	0.09	0.15	0.2	0.17	0.19	0.25	0.3	0.27	0.29
Year 4				**Year 5**				Year 6			
Spring	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**
0.35	0.4	0.37	0.39	0.45	0.5	0.47	0.49	0.55	0.6	0.57	0.59
Year 7				**Year 8**				Year 9			
Spring	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**
0.65	0.7	0.67	0.69	0.75	0.8	0.77	0.79	0.85	0.9	0.87	0.89
Year 10											
Spring	**Summer**	**Autumn**	**Winter**								
0.95	1	0.97	0.99								