

---

## Presenting a multi-regional structure based on a multi-objective economic and vulnerability approach, taking into account new energies and storage.

HasanYaghubi Shahri<sup>1</sup>, Seyed Ali Hosseini<sup>2</sup>, Javad Pourhossein<sup>3</sup>

1- hassan.yaghubi@yahoo.com

2-alihosseini.iau@gmail.com

3-Javad.Pourhossein@iau.ac.ir

### Abstract:

The vulnerability of power grids has not received sufficient attention, even despite the increasing use of new energy sources in the form of microgrids to increase resilience with the approach of reducing energy costs. With the increasing complexity of the structure of power grids and the increasing integration of renewable energy sources in the form of microgrids, the stability and resilience of these systems against functional disruptions and cyber attacks has become a significant challenge. Although the use of microgrids and new energy sources such as solar and wind energy can help reduce dependence on centralized sources and increase the operational flexibility of the grid, recent studies show that in conditions of simultaneous occurrence of disturbances (such as the exit of a power plant and a transmission line or busbar), the current grid structure is still exposed to serious vulnerabilities. This challenge is particularly pronounced when microgrids operate independently of each other. Current approaches to managing energy exchanges between microgrids and the upstream main grid are inefficient, limiting the grid's ability to reduce vulnerability and economically optimize performance. Also, microgrids face problems such as difficulty in integrating with the main grid and real-time monitoring, which leads to an increased risk of instability and inefficiency in the system. To address these challenges, this paper presents a novel solution that provides a solution to reduce vulnerability and cost in a multi-region structure with a multi-objective approach to improve coordination and real-time monitoring. In this structure, there are three independent regions, each containing a microgrid composed of renewable energy sources such as fuel cells, wind, solar, and tidal. These microgrids interact with the upstream grid and aim to reduce the vulnerability of the entire grid as well as reduce costs in each region through efficient energy exchanges. To manage these energy exchanges in a multi-region structure, while maintaining the independence of each region, the distributed primal-dual multiplier (PDMM) method is used. This decentralized energy management method eliminates the need for central control and ensures optimal performance of each region. The architecture presented in this study facilitates the implementation of PDMM, improving the robustness, scalability, and reliability of the system. The proposed framework enables energy exchanges between regions to be carried out in a coordinated and real-time manner and reduces network vulnerability. The research findings show that this method significantly reduces network vulnerability and leads to improved system resilience. The findings of this research show that the proposed method reduces network vulnerability from 21.242 to 20.379 and improves system resilience.

**Keywords:** Multi-regional, multi-objective structure, renewable energies, energy storage and vulnerability

Date of sending: 2025/04/07

Acceptance date: 2025/07/07

Corresponding author's name: Seyed Ali Hosseini

Corresponding author's address: alihosseini.iau@gmail.com

## ارائه یک ساختار چند منطقه مبتنی بر رویکرد چند هدفه اقتصادی و آسیب پذیری با در نظر گرفتن انرژی های نو و ذخیره ساز

نوع مطالعه: پژوهشی

حسن یعقوبی<sup>۱</sup>، سیدعلی حسینی<sup>۱\*</sup>، جواد پورحسین<sup>۱</sup>  
alihosseini.iau@gmail.com

1- دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد، گناباد، ایران.

**چکیده:** آسیب پذیری شبکه های قدرت حتی با وجود استفاده روزافزون از منابع انرژی های نو به صورت ریزشبهه برای افزایش تاب آوری با رویکرد کاهش هزینه انرژی همچنان مورد توجه کافی قرار نگرفته است. با پیچیده تر شدن ساختار شبکه های قدرت و ادغام فزاینده منابع انرژی تجدیدپذیر به صورت ریزشبهه ها، پایداری و تاب آوری این سیستم ها در برابر اختلالات عملکردی و حملات سایبری به چالشی مهم تبدیل شده است. اگرچه استفاده از ریزشبهه ها و منابع انرژی نو نظیر انرژی خورشیدی و بادی می تواند به کاهش وابستگی به منابع متمرکز و افزایش انعطاف پذیری عملیاتی شبکه کمک کند، اما مطالعات اخیر نشان می دهد که در شرایط وقوع هم زمان اختلالات (نظیر خروج نیروگاه و خط انتقال یا باس بار)، ساختار فعلی شبکه همچنان در معرض آسیب پذیری های جدی قرار دارد. این چالش به ویژه زمانی برجسته تر می شود که ریزشبهه ها به طور مستقل از یکدیگر عمل می کنند. رویکردهای کنونی در مدیریت تبادلات انرژی میان ریزشبهه ها و شبکه اصلی بالادستی ناکارآمد بوده و این مسئله توانایی شبکه را در کاهش آسیب پذیری و بهینه سازی اقتصادی عملکرد محدود می سازد. همچنین، ریزشبهه ها با مشکلاتی همچون دشواری در ادغام با شبکه اصلی و نظارت لحظه ای مواجه هستند که منجر به افزایش خطر بی ثباتی و ناکارآمدی در سیستم می شود. برای مقابله با این چالش ها، این مقاله راه حلی نوین ارائه می کند که با روش چند هدفه بهبود هماهنگی و نظارت بلادرنگ، راهکاری برای کاهش آسیب پذیری و هزینه در ساختار چندمنطقه ای ارائه می دهد. در این ساختار، سه منطقه مستقل وجود دارد که هر منطقه شامل یک ریزشبهه متشکل از منابع انرژی های تجدیدپذیر مانند سلول های سوختی، باد، خورشید و جزر و مد است. این ریزشبهه ها با شبکه بالادستی تعامل دارند و هدف آن ها کاهش آسیب پذیری کل شبکه و همچنین کاهش هزینه در هر منطقه از طریق تبادلات انرژی مؤثر است. برای مدیریت این تبادلات انرژی در یک ساختار چندمنطقه ای، ضمن حفظ استقلال هر منطقه، از روش توزیع شده پرایمال-دوآل ضرب کننده ها (PDMM) استفاده شده است. این روش مدیریت انرژی غیرمتمرکز، نیاز به کنترل مرکزی را برطرف کرده و عملکرد بهینه هر منطقه را تضمین می کند. معماری ارائه شده در این مطالعه، با تسهیل پیاده سازی PDMM، استحکام، مقیاس پذیری و قابلیت اطمینان سیستم را ارتقا می دهد. چارچوب پیشنهادی این امکان را فراهم می آورد که تبادلات انرژی میان مناطق به صورت هماهنگ و بلادرنگ انجام شده و آسیب پذیری شبکه کاهش یابد. یافته های پژوهش نشان می دهد که این روش، آسیب پذیری شبکه را به میزان قابل توجهی کاهش داده و منجر به بهبود تاب آوری سیستم می شود. یافته های این پژوهش نشان می دهد که روش پیشنهادی، آسیب پذیری شبکه را از مقدار ۲۱.۲۴۲ به ۲۰.۳۷۹ کاهش داده و تاب آوری سیستم را بهبود می بخشد.

**کلیدواژه ها:** ساختار چند منطقه ای، چند هدفه، انرژی های تجدید پذیر، ذخیره ساز انرژی و آسیب پذیری

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

\* نام نویسنده ی مسئول: سیدعلی حسینی

نشانی نویسنده ی مسئول: دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد، گناباد، ایران

## ۱- مقدمه

طرف دیگر، ظرفیت ریزشکبه‌ها نقش مهمی در بهبود تاب‌آوری سیستم‌های شبکه هوشمند و کاهش آسیب‌پذیری آن‌ها ایفا می‌کند. ریزشکبه‌ها قابلیت تولید انرژی محلی و ذخیره‌سازی انرژی را فراهم می‌آورند و این امکان را فراهم می‌سازند که به صورت مستقل یا به همراه شبکه اصلی عمل کنند. این ویژگی به شبکه بزرگ‌تر افزودنی و پایداری بیشتری می‌دهد و ریزشکبه‌ها را قادر می‌سازد تا حتی در هنگام قطعی‌ها یا حملات سایبری، عملیات خود را ادامه دهند و بخش‌های آسیب‌پذیر شبکه را ایزوله کرده و از عملیات پایدار در سایر مناطق اطمینان حاصل کنند. در همین راستا، آن بنظر می‌رسد که استفاده از ظرفیت ریزشکبه در ساختار چند منطقه ای می‌تواند میزان آسیب‌پذیری شبکه را کاهش دهد.

## ۲-۱- ضرورت انجام تحقیق

همانطور که قبلاً بیان شد، یکی از مشکلات اصلی در این شبکه‌ها، خطر شکست‌های زنجیره‌ای و خاموشی است که به‌ویژه در مواقعی که قطعی‌ها یا مشکلات در یکی از بخش‌ها رخ می‌دهند، قسمت‌های دیگر شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بخش‌های خاصی از ساختار شبکه در این شرایط در معرض آسیب‌پذیری بالاتری قرار دارند، به‌ویژه زمانی که مقادیر شاخص‌های آسیب‌پذیری شبکه پایین‌تر از حد آستانه پیش‌بینی شده باشند. این موضوع به‌طور جدی نیازمند توجه به توسعه سیستم‌های هوشمند و مدیریت بهینه منابع انرژی در سطح شبکه‌های چند منطقه‌ای است. در این میان، بخش‌های خاصی از ساختار شبکه که در نقاط کلیدی یا گلوگاه‌های استراتژیک قرار دارند، در چنین سناریوهایی بیشتر در معرض خطر هستند. اگر شاخص‌های آسیب‌پذیری (مانند شاخص بار بحرانی، درجه مرکزیت در شبکه، یا شاخص عدم‌تعادل انرژی) در این بخش‌ها کمتر از حد آستانه تعریف‌شده باشند، احتمال فروپاشی سیستم به‌مراتب بیشتر

با گسترش روزافزون تقاضا برای انرژی و نیاز به تأمین پایدار و کارآمد آن، شبکه‌های قدرت برای پاسخگویی به این تقاضاها به سرعت در حال توسعه هستند. این گسترش، به‌ویژه در مواقع بروز بحران یا اختلالات ناگهانی، می‌تواند منجر به بروز مشکلات جدی برای سیستم‌های قدرت شود. یکی از چالش‌های اصلی در این راستا آسیب‌پذیری شبکه‌های برق است که در اثر رشد ناموزون زیرساخت‌ها و افزایش وابستگی به تأمین انرژی از نقاط مختلف به‌ویژه در شبکه‌های چند منطقه‌ای به‌وجود می‌آید. شبکه‌های چند منطقه‌ای به‌عنوان یک راه‌حل برای پایداری و کاهش آسیب‌پذیری در برابر اختلالات فنی مطرح شده‌اند، اما هنوز مشکلات قابل توجهی در هماهنگی و یکپارچگی عملیات در این شبکه‌ها وجود دارد.

## ۱-۱- انگیزه تحقیق

هنگامی که شبکه برق برای پاسخگویی به تقاضاهای فزاینده گسترش می‌یابد، مناطق آسیب‌پذیری ایجاد می‌شود که در معرض خطر شکست‌های زنجیره‌ای و خاموشی قرار دارند. از این‌رو، پس از بررسی تحلیل آسیب‌پذیری شبکه، مشخص شده است که بخش‌های خاصی از ساختار شبکه در معرض خطر آسیب هستند، به‌ویژه زمانی که شاخص‌های آسیب‌پذیری از آستانه مشخصی در طول قطع خطوط یا ژنراتورها پایین‌تر بیافتند. شناسایی دقیق این بخش‌های آسیب‌پذیر بسیار حیاتی است. این مسئله توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است؛ چرا که اثبات شده در صورت عدم اجرای اقدامات پیشگیرانه برای آمادگی شبکه در برابر چنین خطاهایی، احتمال وقوع خاموشی‌ها و شکست‌های زنجیره‌ای وجود دارد. ساختار چند منطقه‌ای یکی از راهکارهای موثر در کاهش اثر خطاهای زنجیره‌ای است. از

برقرار کنند و از تبادلات انرژی بهینه در شبکه های بزرگ استفاده کنند. از آنجایی که عملکرد شبکه های چند منطقه ای به هماهنگی دقیق میان بخش ها نیاز دارد، این سیستم های توزیع شده به ویژه در مواقع بحران از اهمیت بیشتری برخوردار خواهند شد. بنابراین، تلاش برای بهینه سازی عملکرد ریزشبکه ها و پیاده سازی ساختارهای کنترل توزیع شده در این شبکه ها می تواند به کاهش قابل توجهی در آسیب پذیری و بهبود تاب آوری سیستم های برق منجر شود.

### ۳-۱- پیشینه تحقیق

اقدامات حفاظتی برای اطمینان از امنیت و ایمنی عملیات شبکه هوشمند ضروری هستند. در توسعه شبکه هوشمند، قابلیت اطمینان مکانیزم های حفاظتی بیشتر از تأیید امنیت کلی سیستم اولویت بندی شده است [۱]. در حالی که قابلیت اطمینان شبکه با تقویت این تدابیر حفاظتی افزایش می یابد، پیچیدگی بیشتر آن ها می تواند به احتمال خرابی بیشتر منجر شود [۲]. تجربه نشان داده است که نقص در دستگاه های حفاظتی پنهان می تواند باعث وقوع شکست های زنجیره ای شود که در نهایت ممکن است خاموشی های گسترده ای در شبکه ایجاد کند. مطالعه ای که توسط "شورای قابلیت اطمینان شبکه الکتریکی آمریکای شمالی (NERC)" انجام شده، نشان می دهد که حدود ۷۵ درصد از اختلالات عمده به دستگاه های حفاظتی پنهان مرتبط است [۳-۵]. تعداد زیادی از مصرف کنندگان در ایالات متحده طی سال های اخیر تحت تأثیر قطعی های قابل توجهی قرار گرفته اند. این خاموشی های مستند، همگی با نقص دستگاه های حفاظتی پنهان مرتبط بوده اند که به واسطه اختلالات دیگر سیستم به وجود آمده اند. این شرایط شبکه را آسیب پذیر می سازد. با توجه به توسعه مستمر و افزایش پیچیدگی شبکه، اپراتورها باید از آسیب پذیری های سیستم تحت شرایط موجود آگاه باشند [۶].

خواهد شد. بنابراین، شناسایی نواحی آسیب پذیر و تحلیل ساختار شبکه از منظر توپولوژی و پویایی جریان انرژی، از اهمیت حیاتی برخوردار است. در پاسخ به این چالش ها، توسعه و پیاده سازی سیستم های هوشمند مدیریتی و ابزارهای تحلیل پیشرفته به منظور رصد، پیش بینی و کنترل رفتار شبکه در شرایط بحرانی، ضرورتی انکارناپذیر به شمار می رود. این سیستم ها، که معمولاً شامل فناوری هایی مانند اینترنت اشیا (IoT)، یادگیری ماشین، تحلیل کلان داده ها، و سامانه های تصمیم یار مبتنی بر هوش مصنوعی هستند، می توانند به بهینه سازی مدیریت منابع انرژی، افزایش تاب آوری شبکه، و کاهش خطرات ناشی از اختلالات زنجیره ای کمک شایانی کنند. علاوه بر این، طراحی ساختارهای ماژولار و مقاوم در شبکه های چندمنطقه ای (multi-regional networks)، پیاده سازی هاب های انرژی منطقه ای، و استفاده از سیستم های ذخیره سازی انرژی مانند باتری های پیشرفته و واحدهای پاسخ به بار (Demand Response Units)، می تواند به ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا کمک کرده و از گسترش بحران ها جلوگیری نماید. در مجموع، مقابله با پدیده شکست های زنجیره ای نه تنها نیازمند رویکردی چندرشته ای و میان بخشی است، بلکه مستلزم سرمایه گذاری هوشمند در فناوری، بازطراحی معماری شبکه، و ارتقای ظرفیت های مدیریتی در سطوح مختلف عملیاتی، نظارتی و سیاست گذاری است.

ریزشبکه ها به عنوان یکی از راه حل های مؤثر برای کاهش آسیب پذیری شبکه های برق، می توانند در شبکه های چند منطقه ای نقش تعیین کننده ای ایفا کنند. به منظور افزایش کارایی و عملکرد بهینه ریزشبکه ها در شبکه های چند منطقه ای، استفاده از سیستم های کنترل توزیع شده می تواند یک راه حل مناسب باشد. این سیستم ها به ریزشبکه ها اجازه می دهند تا در عین استقلال عمل، با یکدیگر ارتباط مؤثر

اصطلاح "آسیب‌پذیری" تعریف جهانی پذیرفته‌شده‌ای ندارد. به‌طور کلی، شبکه‌ای غیر آسیب‌پذیر به عنوان شبکه‌ای توصیف می‌شود که توانایی مقاومت در برابر تمامی احتمالات، حفظ پایداری و بازیابی بدون عبور از محدودیت‌های سیستم را دارد. [7] در این زمینه، آسیب‌پذیری به نقایص و ضعف‌هایی اطلاق می‌شود که خطر آسیب به سیستم برق را افزایش می‌دهند. ارزیابی آسیب‌پذیری در حالت پایدار (SSVA) و ارزیابی آسیب‌پذیری دینامیکی (DVA) می‌توانند نقاط ضعف شبکه را شناسایی کنند. نویسندگان مرجع [۸] بر اهمیت این ارزیابی‌ها در تعیین اثربخشی اقدامات شبکه الکتریکی تأکید کرده‌اند. یکپارچه‌سازی ریزشبکه‌ها در سیستم‌های شبکه هوشمند تأثیر قابل توجهی بر آسیب‌پذیری دارد، به‌ویژه در زمینه تاب‌آوری در برابر تهدیدات سایبری و اختلالات عملیاتی. ریزشبکه‌ها مدیریت انرژی هدفمند و واکنش سریع به تغییرات تقاضا را ممکن می‌کنند و در نتیجه، قابلیت اطمینان و کارایی شبکه‌های هوشمند را افزایش می‌دهند. با این حال، این یکپارچه‌سازی خطرانی، به‌ویژه در ارتباط با وابستگی‌های متقابل سایبری-فیزیکی، به همراه دارد. با استفاده از راهبردهای ذخیره‌سازی انرژی و واکنش تقاضا، ریزشبکه‌ها می‌توانند در شرایط بحرانی به‌طور مستقل عمل کنند و کاهش بار و حفظ پایداری سیستم را میسر سازند [۹]. الگوریتم‌های پیشرفته کنترل و فناوری‌های ارتباطی توانایی ریزشبکه‌ها برای مدیریت منابع انرژی و واکنش به چالش‌های غیرمنتظره را ارتقا می‌بخشند. این روش‌ها به تقویت انعطاف‌پذیری و استقلال سیستم‌های توزیع در مقابل تهدیدات سایبری و خطاهای عملیاتی کمک می‌کنند. در عین حال، ارتباط نزدیک بین زیرساخت‌های فیزیکی و سیستم‌های سایبری نیاز به حفاظت و کنترل مداوم را تشدید می‌کند. با این حال، این ادغام سایبری-فیزیکی همچنین باعث می‌شود که ریزشبکه‌ها در معرض حملات سایبری قرار

گیرند، که ممکن است منجر به اختلال در عملیات و زیان‌های مالی قابل توجه شود [۱۰]. این ریسک به‌ویژه در ریزشبکه‌های ایزوله‌شده، جایی که حملات می‌توانند یکپارچگی داده‌ها را تهدید کنند، تنظیم فرکانس را مختل نمایند و ثبات سیستم را به خطر اندازند، شدیدتر است [۱۱]. برای ریزشبکه‌هایی که به شبکه اصلی متصل هستند، دو نوع اصلی از سیستم‌های مدیریت انرژی (EMS) در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد: متمرکز و توزیع‌شده [۱۲]. در حالی که راه‌اندازی یک مرکز متمرکز برای جمع‌آوری داده‌های عمومی برای EMS ممکن است ساده به نظر برسد، این رویکرد با چالش‌های اساسی مانند فاصله‌های طولانی اتصال، تأخیرهای محاسباتی بالا، و در نتیجه، قابلیت اطمینان پایین مواجه است [۱۳]. از این رو، ادبیات پژوهش تأکید بر اهمیت ساختاری غیرمتمرکز برای سیستم ریزشبکه دارد. این رویکرد غیرمتمرکز هر ریزشبکه را تشویق می‌کند تا با یک EMS محلی یکپارچه شود که سپس می‌تواند با دیگر EMS های محلی مجاور تعامل داشته باشد تا به نتایجی مشابه ساختار متمرکز دست یابد. در همین راستا، در مقاله [۱۴] به بهینه‌سازی کنترل فرکانس بار در یک ریزشبکه چندمنطقه‌ای مبتنی بر کارخانه تصفیه آب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی هارریس هاوکس<sup>۱</sup> پرداخته شده است. مقاله به‌طور ویژه به استفاده از یک کنترلر ۳ درجه آزادی با مدل‌های FO-PIDN و TIDN در فرآیند کنترل فرکانس بار می‌پردازد. نتیجه این بهینه‌سازی‌ها بهبود عملکرد کنترل بار و افزایش استحکام سیستم‌های ریزشبکه‌ای را نشان می‌دهد. مقاله به این نتیجه می‌رسد که استفاده از الگوریتم HHO می‌تواند به کاهش خطاهای فرکانسی و بهبود همگام‌سازی سیستم کمک کند. این مقاله برای سیستم‌های ریزشبکه‌ای چندمنطقه‌ای کاربردهای بسیاری در کنترل و بهینه‌سازی دارد. نویسندگان در [۱۵] به تنظیم بهینه کنترل مجازی اینرسی و استفاده از

<sup>۱</sup> HHO

[۲۰]، روش مبتنی بر لاگرانژین پرایمال-دوآل، و روش جهت گیری متناوب ضرب کننده ها (ADMM) [۲۱]. لازم به ذکر است که مسئله توزیع شده متکی به روش اول با چالش هایی روبه رو است، زیرا نیاز به یک تابع هدف درجه دوم دارد [۲۲]. مسئله نقطه زین در رویکرد بهینه سازی مانع می شود که روش دوم به راه حل بهینه جهانی دست یابد، هر چند که دارای ساختاری عمومی است. یکی از مزایای مهم روش جهت گیری متناوب ضرب کننده ها (ADMM) ساختار انعطاف پذیر آن است که باعث می شود در طی فرآیند همگرایی به تعداد کمتری از تکرارها نیاز باشد. علاوه بر این، یک روش جدید مبتنی بر روش پرایمال-دوآل ضرب کننده ها (PDMM) برای مسائل توزیع شده پیشنهاد شده است؛ با این حال، این روش از ADMM متفاوت است زیرا پارامترهای کمکی را در نظر نمی گیرد. همچنین در مقاله [۲۳] یک روش بهینه سازی توزیع شده چندهدفه برای زمان بندی سیستم های یکپارچه برق و هیدروژن ارائه شده است. این تحقیق به ارزیابی و بهینه سازی تخصیص منابع انرژی در سیستم های یکپارچه می پردازد تا بتوان بهترین عملکرد را با توجه به جنبه های اقتصادی و زیست محیطی تحقق بخشید. یک الگوریتم اجماع توزیع شده چندهدفه را برای تنظیم اقتصادی چندمنطقه ای در سیستم های قدرت بزرگ مقیاس در مقاله [۲۴] ارائه می دهد. بر اساس مرور منابع ارائه شده، پژوهش های متعددی تاکنون به مدل سازی ریزشبکه ها، ساختارهای چندمنطقه ای و استفاده از روش های حل توزیع شده پرداخته اند. منابع [۱۰]، [۵]، [۸] و [۱۹] تمرکز ویژه ای بر مدل سازی ریزشبکه ها در چارچوب های مختلف دارند، به ویژه در زمینه یکپارچه سازی منابع انرژی نو و بهره برداری محلی از انرژی. از سوی دیگر، مقالات [۱۴]، [۱۵] و [۱۶] ساختار چندمنطقه ای شبکه قدرت را در قالب تعامل میان چند ریزشبکه بررسی کرده اند که می تواند به درک بهتری از پویایی و آسیب پذیری شبکه منجر شود. در حوزه روش های حل

کنترلر FOPID در سیستم های برق چندمنطقه ای متصل به هم با استفاده از الگوریتم MOFPA می پردازد. این الگوریتم توانایی تنظیم بهینه پارامترهای کنترل را برای حفظ پایداری و کارایی سیستم های پیچیده متصل به هم فراهم می آورد. به طور ویژه، هدف مقاله بهبود عملکرد کنترلرها در شرایط مختلف بار و اختلالات سیستم است. روش های پیشنهاد شده در این مقاله برای بهینه سازی سرعت پاسخ دهی سیستم و بهبود بهره وری شبکه های پیچیده مورد بررسی قرار گرفته اند. نویسندگان در [۱۶] رویکردی توزیع شده سلسله مراتبی را برای بهبود ارسال انرژی در سیستم های ریزشبکه پیشنهاد داده اند. با این حال، این روش هزینه تولید انرژی بر اساس توان خروجی را در نظر نمی گیرد و به نظر می رسد به شبکه های اتصال ستاره ای محدود است. برای دستیابی به راه حل های بهینه از طریق محاسبات محلی، تکنیک های توزیع شده اخیر بر روش های تبادل داده میان عوامل (agents) نزدیک تمرکز کرده اند. در این چارچوب، هر عامل می تواند به صورت دوطرفه با عوامل مستقیم متصل به خود ارتباط برقرار کرده و داده های خود را به اشتراک بگذارد. سپس هر عامل از اطلاعات دریافتی برای محاسبه راه حل بهینه خود به صورت محلی استفاده می کند. این فرآیند تکراری ادامه می یابد تا زمانی که عوامل به یک توافق (اجماع) برسند. یک تکنیک ترکیبی که از ساختارهای توزیع شده و متمرکز بهره می برد، در مراجع [۱۷-۱۸] معرفی شده است. با این حال، بررسی های بیشتر نشان داد که این روش همچنان به هماهنگ کنندگان مرکزی وابسته است. علاوه بر این، یک تکنیک توزیع شده دو مرحله ای در مرجع [۱۹] ارائه شده است که از تبادل قیمت بین ریزشبکه های نزدیک برای حفظ حریم خصوصی هر ریزشبکه استفاده می کند.

سه پایه نظری برای تکنیک های بهینه سازی سیستم مدیریت انرژی (EMS) توزیع شده عبارتند از: روش میانگین گیری وزنی

شبکه و بهینه‌سازی عملکرد محدود می‌کند. علاوه بر این، ریزشبکه‌های دورافتاده با دشواری‌هایی در ادغام با شبکه اصلی و نظارت لحظه‌ای روبرو هستند که خطر بی‌ثباتی و ناکارآمدی را افزایش می‌دهد.

این پژوهش یک راه‌حل نوین برای پر کردن این شکاف ارائه می‌دهد، با هدف تقویت هماهنگی و نظارت بلادرنگ برای افزایش عملکرد ریزشبکه‌ها و کاهش آسیب‌پذیری شبکه. به طور خاص، ما بر روی سه ریزشبکه جداگانه تمرکز می‌کنیم که از منابع انرژی شامل سلول‌های سوختی، باد، خورشید و جزر و مد برای تأمین بارهای محلی خود استفاده می‌کنند. این ریزشبکه‌ها برای بهبود پایداری شبکه با شبکه برق بالادستی ارتباط برقرار می‌کنند.

برای تسهیل هماهنگی مؤثر تبادلات انرژی در میان این ریزشبکه‌ها، ضمن حفظ استقلال آن‌ها، ما یک سیستم مدیریت انرژی غیرمتمرکز را بر اساس روش پرایمال-دوآل ضرب‌کننده‌ها (PDMM) پیشنهاد می‌کنیم. این طراحی، نیاز به مدیریت غیرمتمرکز را با تضمین عملکرد بهینه هر ریزشبکه بدون نیاز به کنترل مرکزی برطرف می‌سازد. همچنین، ما یک معماری مدیریت سیستم توزیع غیرمتمرکز را برای تسهیل استفاده از PDMM در این محیط پیشنهاد می‌کنیم و قابلیت‌هایی مانند استحکام، مقیاس‌پذیری و قابلیت اطمینان سیستم را تضمین می‌نماییم. این مطالعه با رویکردی جامع به کاهش آسیب‌پذیری شبکه و بهبود عملکرد ریزشبکه‌ها در یک سیستم قدرت توزیع‌شده می‌پردازد.

- آسیب‌پذیری شبکه‌های قدرت و مشکلات ریزشبکه‌های مستقل: ناتوانی رویکردهای فعلی در مدیریت مؤثر تبادلات انرژی بین ریزشبکه‌ها و شبکه اصلی، محدودیت در کاهش آسیب‌پذیری شبکه و ایجاد مشکلات در ریزشبکه‌های دورافتاده.
- راه‌حل نوین برای تقویت هماهنگی و نظارت بلادرنگ: ارائه روشی جدید برای بهبود هماهنگی و نظارت در ریزشبکه‌ها

توزیع‌شده، مقالات [۱۲]، [۱۳]، [۲۲]، [۲۳] و [۲۴] با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی توزیع‌شده مانند ADMM و PDMM به کاهش پیچیدگی محاسباتی و بهبود مقیاس‌پذیری در مدل‌سازی شبکه‌های بزرگ کمک کرده‌اند. منبع [۱۹] نیز تلفیقی از مدل‌سازی ریزشبکه و استفاده از روش توزیع‌شده را ارائه می‌دهد. این دسته‌بندی نشان می‌دهد که اگرچه هر یک از موضوعات در برخی منابع به‌خوبی پوشش داده شده‌اند، اما پژوهشی که ترکیب سه محور مذکور را در یک چارچوب یکپارچه تحلیل و پیاده‌سازی کند، همچنان مورد نیاز است. یک مروری بر خلاصه مقایسه مقالات گذشته بر اساس سه مفهوم ساختار چند منطقه‌ای، روش توزیع‌شده و ریزشبکه در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): مقایسه بین مقالات گذشته بر اساس سه حوزه روش حل توزیع‌شده، ساختار چند منطقه‌ای و مدل‌سازی ریزشبکه

روش حل توزیع شده	ساختار چند منطقه‌ای	مدل سازی ریز شبکه	مرجع
-	-	✓	[۱۰]
✓	-	-	[۱۲]
✓	-	-	[۱۳]
-	✓	✓	[۱۴]
-	-	✓	[۵]
✓	✓	-	[۲۴]
✓	-	-	[۲۲]
✓	-	✓	[۱۹]
-	✓	✓	[۱۵]
✓	✓	-	[۲۳]
-	✓	✓	[۱۶]
-	-	✓	[۸]

#### ۴-۱- نوآوری تحقیق

آسیب‌پذیری شبکه‌های قدرت همچنان تا حد زیادی نادیده گرفته شده است، حتی با افزایش استفاده از ریزشبکه‌ها برای بهبود تاب‌آوری انرژی، به ویژه زمانی که چندین ریزشبکه مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند. ناتوانی رویکردهای فعلی در مدیریت مؤثر تبادلات انرژی بین این ریزشبکه‌ها و شبکه اصلی بالادست، ظرفیت آن‌ها را برای کاهش آسیب‌پذیری

تاب آوری آن بررسی کرد، که در نهایت منجر به اطمینان از یک سیستم برق پایدار و قابل اعتماد می شود.

#### ۱-۲- تعریف ریاضی شبکه بالادست

برای دستیابی مؤثر به اهداف ذکر شده، ضروری است که ساختار زیرساختی شبکه برق قبل از انجام تحلیل آسیب پذیری و استفاده از سیستم هاب مشخص شود. به همین دلیل، این بخش بر هدف تابع و محدودیت های مربوطه همراه با چارچوب ریاضی که رفتار شبکه را توصیف می کند، تأکید دارد. در این مورد، شبکه برق از باس ها تشکیل شده است که اتصالاتی هستند که تولیدکنندگان را به نیازهای بار متصل می کنند و همچنین واحدهای تولیدی که از سوخت های فسیلی برای تولید برق استفاده می کنند. یک زمان بند انرژی بهینه برای برآورده کردن نیازهای برق به کار گرفته می شود که به طور مؤثر هزینه های مرتبط با واحدهای تولیدی را کاهش می دهد. این هزینه ها شامل هزینه تأمین توان فعال و هزینه های خاموش کردن/راه اندازی واحدهاست، که در تابع هدف (۱) آورده شده است. لازم به ذکر است که در صورتی که محدودیت های فنی برای عملیات درون شبکه برطرف شود، این هدف به دقت دنبال خواهد شد. معادلات (۲) و (۳) نقش بسیار مهمی در تعریف ظرفیت عملیاتی تولیدکنندگان برای تأمین توان های اکتیو (P) و راکتیو (Q) ایفا می کنند. این معادلات بیانگر محدودیت های تولیدی هر واحد هستند که معمولاً بر اساس مشخصات فنی ژنراتورها، شرایط محیطی، و تنظیمات کنترلی آنها تعیین می شوند. در واقع، این روابط مشخص می کنند که در هر لحظه، یک ژنراتور تا چه میزان توان می تواند تولید کند بدون آن که از محدوده های مجاز خود تجاوز نماید. در ادامه، معادلات (۴) و (۵) به جنبه زمان بندی تصمیم گیری در سیستم قدرت می پردازند. این معادلات نشان می دهند که تنظیمات مربوط به رزرو توان (اعم از فعال و راکتیو) بر اساس اطلاعات یک

به منظور افزایش عملکرد و کاهش آسیب پذیری شبکه از طریق تبادلات انرژی مؤثر.

- سیستم مدیریت انرژی غیرمتمرکز با استفاده از PDMM: پیشنهاد طراحی یک سیستم مدیریت انرژی غیرمتمرکز با استفاده از روش پرایمال-دوآل ضرب کننده ها (PDMM) برای تضمین عملکرد بهینه ریزشبکه ها بدون نیاز به کنترل مرکزی.
- معماری مدیریت سیستم توزیع غیرمتمرکز: توسعه معماری متمرکز برای تسهیل استفاده از PDMM و تضمین استحکام، مقیاس پذیری و قابلیت اطمینان سیستم در جهت کاهش آسیب پذیری شبکه و بهبود عملکرد ریزشبکه ها.

#### ۵-۱- سازماندهی تحقیق

در ادامه مقاله به صورت زیر است: بخش ۲ به تعریف فرمولاسیون مسئله اختصاص دارد. همچنین، بخش ۳ مدل امنیت داده ها را بر اساس روش توزیع شده در سیستم ریزشبکه های چندگانه نشان می دهد. ساختار پیشنهادی چارچوب توزیع شده دیجیتال در بخش ۴ ارائه شده است. نتایج شبیه سازی در بخش ۵ تحلیل شده اند. در نهایت، بخش ۶ به محاسبات مربوط می شود.

#### ۲- تعریف مسئله

این بخش بر ساختار فیزیکی شبکه برق و مدلسازی آسیب پذیری های آن متمرکز است. هدف خاص ما بررسی شاخص های آسیب پذیری به منظور درک تأثیر آنها بر پایداری و قابلیت اطمینان سیستم قدرت است. این آسیب پذیری ها می توانند احتمال خاموشی ها و اختلالات را افزایش دهند، به ویژه زمانی که شبکه در معرض تهدیدات خارجی مانند حملات سایبری یا تغییرات ناگهانی در عرضه و تقاضا قرار گیرد. با تحلیل این شاخص ها می توان مکان های بحرانی درون شبکه را شناسایی کرد و روش هایی برای تقویت

$$C^{grid} = \min \sum_t \sum_u \left[ C(P_{u,t}^{grid}) + U_{u,t}^{grid} \right] + D_{u,t}^{grid} \quad (1)$$

$$P_u^{min} y_{u,t} \leq P_{u,t}^{grid} \leq P_u^{max} y_{u,t} \quad \forall t \in \Omega^T \quad (2)$$

$$Q_u^{min} y_{u,t} \leq Q_{u,t}^{reactive} \leq Q_u^{max} y_{u,t} \quad \forall t \in \Omega^T \quad (3)$$

$$P_{u,t}^{grid} - P_{u,t-1}^{grid} \leq Res_u^+ y_{u,t-1} \quad \forall t \in \Omega^T \quad (4)$$

$$P_{u,t-1}^{grid} - P_{u,t}^{grid} \leq Res_u^+ y_{u,t} \quad \forall t \in \Omega^T \quad (5)$$

$$\sum_{\forall u(v)} (P_{u,t}^{grid}) - \sum_{\forall k(v,m)} (P_{r,t}^{line}) = P_{v,t}^{load} + \quad (6)$$

$$P_t^{l3} + P_t^{l2} + P_t^{l1} \quad \forall t \in \Omega^T, \forall v \in \Omega^V$$

$$\sum_{\forall u(v)} Q_{u,t}^{reactive} + \quad (7)$$

$$\sum_{\forall k(v,m)} (Q_{r,t}^{line}) = Q_{v,t}^{load} \quad \forall t \in \Omega^T, \forall v \in \Omega^V$$

$$P_r^{line} = (\Delta V_v - \Delta V_m) R^{-1} b_r - \quad (8)$$

$$b g_r \phi_r, \forall m \in \Omega^m, \forall v \in \Omega^V, \forall r \in \Omega^r$$

$$P_r^{line} = -(1 + 2\Delta V_v) b g_{k0} - (\Delta V_v - \Delta V_m) b g_r \quad (9)$$

$$-g b_r \phi_r, \forall m \in \Omega^m, \forall v \in \Omega^V, \forall r \in \Omega^r$$

$$\phi_r^{min} \leq \phi_{r,t} \leq \phi_r^{max} \quad \forall t \in \Omega^T, \forall r \in \Omega^r \quad (10)$$

$$\Delta V^{min} \leq \Delta V_{v,t} \leq \Delta V^{max} \quad \forall t \in \Omega^T, \forall v \in \Omega^V \quad (11)$$

$$-P_r^{line,max} \leq P_r^{line} \leq P_r^{line,max} \quad \forall t \in \Omega^T, \forall r \in \Omega^r \quad (12)$$

$$-Q_r^{line,max} \leq Q_r^{line} \leq Q_r^{line,max} \quad \forall t \in \Omega^T, \forall r \in \Omega^r \quad (13)$$

## ۲-۲- تعریف تحلیل آسیب پذیری

شکست‌های زنجیره‌ای و خاموشی‌ها در سیستم قدرت به دلیل ساختار سیستم و تقاضاهای فزاینده آن به‌طور فزاینده‌ای محتمل می‌شوند. این مشکلات معمولاً شامل یک سری از شکست‌های زنجیره‌ای هستند، که شناسایی نواحی آسیب‌پذیر برای کاهش خطرات بالقوه برای جامعه را ضروری

ساعت گذشته از وضعیت سیستم انجام می‌شود. این رویکرد در سیستم‌های کنترل پیش‌بینانه و یا بهره‌برداری نیمه‌بلادرنگ، متداول است و به اپراتور اجازه می‌دهد تا با در نظر گرفتن تغییرات تدریجی بار، منابع رزرو مناسبی را تخصیص دهد.

معادلات (۶) و (۷) به یکی از اساسی‌ترین چالش‌های بهره‌برداری از شبکه قدرت می‌پردازند: تعادل بین توان تولیدی و توان مصرفی در سطح هر ناحیه یا کل شبکه. این معادلات، به‌ویژه در سیستم‌های چندمنطقه‌ای و ریزشبکه‌ها اهمیت دوچندانی دارند، چرا که مدیریت توان راکتیو و ولتاژ در نواحی توزیع‌شده نیازمند هماهنگی دقیق بین تولیدکنندگان محلی، منابع انرژی تجدیدپذیر، و بارهای متغیر است. عدم تعادل در این بخش می‌تواند منجر به افت یا افزایش ولتاژ، بی‌ثباتی زاویه‌ای، و حتی جدایی ناحیه‌ای شود.

محدودیت‌های تعریف‌شده در معادلات (۸) تا (۱۳) مجموعه‌ای از قیود فیزیکی و بهره‌برداری هستند که ولتاژ و زاویه باس‌بارها را در محدوده مجاز حفظ می‌کنند. کنترل این مقادیر برای جلوگیری از نوسانات شدید ولتاژ، پخش توان ناخواسته، و حفظ پایداری دینامیکی سیستم ضروری است. تنها در صورتی که باس‌بارها در محدوده‌های ولتاژی و زاویه‌ای تعیین‌شده قرار داشته باشند، اجازه عبور توان از طریق خطوط انتقال صادر می‌شود. این قیود معمولاً به کمک الگوریتم‌های پخش توان یا بهینه‌سازی بهره‌برداری در هر دوره زمانی کنترل و اعمال می‌شوند.

در مجموع، این معادلات و محدودیت‌ها چارچوب پایه‌ای مدل‌سازی سیستم قدرت را تشکیل می‌دهند و به‌ویژه در طراحی سیستم‌های چندمنطقه‌ای یا ریزشبکه‌هایی با مدیریت توزیع‌شده، مبنای تحلیل و تصمیم‌گیری‌های بهینه هستند.

می سازد [۲۵]. به عبارت دیگر، ارزیابی آسیب پذیری سیستم قدرت می تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای اندازه گیری و ارزیابی وقوع و ضعف های خطوط یا بخش های خاص سیستم در رابطه با شکست های زنجیره ای عمل کند. هدف این مطالعه، بررسی دو استراتژی عملی برای پیشگیری از خاموشی های گسترده از منظر فنی و امنیت سایبری است.

برای ارزیابی آسیب پذیری شبکه برق، ابتدا باید یک تکنیک مدلسازی مناسب توسعه داده شود. این شامل شناسایی نقاط ضعف شبکه با استفاده از شاخص های مبتنی بر اختلال است که بر اساس چندین عامل اساسی در رابطه با دو سناریو محاسبه می شوند: (۱) در هنگام عملیات عادی، و (۲) عملکرد سیستم قدرت در زمان اختلال شبیه سازی شده. هرگونه اختلال، مانند قطع یک خط انتقال یا واحد تولیدی، می تواند بر بخش های کوچک و بزرگ شبکه برق تأثیر بگذارد. برای اهداف این تحلیل، فرض کنید یک شبکه برق دارای  $L$  خط انتقال،  $B$  باس و  $G$  واحد تولید است. از فرمول زیر می توان برای تعیین پیامدهای غیرمنتظره ناشی از شکست در خط انتقال  $k$ th و تولیدکننده  $g$ th بر اجزای اصلی شبکه، شامل باس ها، خطوط و واحدهای تولید استفاده کرد:

#### • شاخص های آسیب پذیری خط

برای ارزیابی آسیب پذیری خطوط شبکه در برابر خرابی خط  $k$ ، همان روش استفاده شده برای شاخص های آسیب پذیری باس ها می تواند به طور مشابه به کار رود:

$$L_i^k = \left( \frac{P_i^k}{P_i^{max}} \right)^2 \times \left( \frac{P_i^k - P_{normal,l}^k}{P_i^{max} - P_i^k} \right)^2 \quad (16)$$

$$VIL_i^k = \begin{cases} 1 \rightarrow L_i^k > L_i^{basic} \\ 0 \rightarrow L_i^k < L_i^{basic} \end{cases} \quad (17)$$

همان طور که قبلاً ذکر شد، وقایع زنجیره ای می توانند منجر به خاموشی سراسری در شبکه برق شوند. به عنوان مثال، اگر در یکی از خطوط (خط  $k$ ) خطایی رخ دهد، جریان برق در سایر خطوط ممکن است به سطحی برسد که بار آن ها از حد مجاز فراتر رود. برای حفظ عملیات پایدار، سیستم کنترل ایمنی شبکه باید دستورات قطع خطوط آسیب دیده را صادر کند. معادله (۱۶) آسیب پذیری سیستم در این زمینه را ارزیابی می کند. این معادله  $L_i^k$  را به عنوان شاخص خرابی خط  $k$  برای خطوط شبکه تعریف می کند که بر اساس شرایط عادی و خطا محاسبه می شود  $VIL_i^k = 1$  در معادله (۱۷) نشان می دهد که جریان برق خط  $l$  تحت تأثیر خرابی خط  $k$  قرار دارد و بالعکس.

#### • شاخص های آسیب پذیری شین

با استفاده از شاخص های آسیب پذیری که در معادلات (۱۴) و (۱۵) تعریف شده اند، این بخش هدف دارد تا تأثیر قطع یک خط انتقال  $k$  بر باس های شبکه را نشان دهد. در اینجا،  $B_b^k$  به عنوان شاخص خرابی خط  $k$  در باس  $b$  تعریف شده و  $VIB_b^k$  شاخص باس برای قطع خط  $k$  است. لازم به ذکر است که متغیر  $TV_b$  انحراف ولتاژ در نظر گرفته شده و  $1 - TV_b$  ولتاژ باس  $b$  را نشان می دهد. بر اساس معادله (۱)، در صورت بروز خرابی در خط  $k$ ، ولتاژ باس  $b$  تحت تأثیر قرار گرفته و از سطح عادی به سطح بحرانی تغییر خواهد کرد، که به وسیله  $1 -$

خطوط قطع شده، توسط زیراندازه‌های سطر و ستون‌های  $\overline{LO}$  نمایان می‌شوند.

$$\overline{LO} = \begin{matrix} \leftarrow k:1,2,\dots,L \rightarrow \\ \begin{bmatrix} \overline{VIB} \\ \overline{VIL} \\ \overline{VIQ}, \overline{VIG} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (22)$$

خرابی‌های ژنراتور می‌توانند به جای خرابی خطوط شبیه‌سازی شوند و شاخص‌های آسیب‌پذیری برای باس‌ها، خطوط و واحدهای تولید به شیوه‌ای مشابه با خرابی خطوط محاسبه می‌شوند. در نتیجه، معادله (۲۳) ماتریس آسیب‌پذیری ناشی از شاخص خرابی ژنراتور را ارائه می‌دهد.

$$\overline{GO} = \begin{matrix} \leftarrow g:1,2,\dots,G \rightarrow \\ \begin{bmatrix} \overline{VIB} \\ \overline{VIL} \\ \overline{VIQ}, \overline{VIG} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (23)$$

معادله (۲۴) پارامتر R را تعریف می‌کند که از تعداد اجزای شبکه شامل باس‌ها، خطوط و واحدهای تولید ( $R = L + B + G$ ) تشکیل شده است. این معادله می‌تواند برای محاسبه شاخص خرابی خطوط شبکه (NLO) استفاده شود که نشان‌دهنده نسبت اثرات اختلال ناشی از خرابی یک خط است. به‌طور مشابه، شاخص خرابی ژنراتور شبکه (NGO) که با استفاده از معادله (۲۵) محاسبه می‌شود، آسیب‌پذیری مربوط به خرابی یک ژنراتور را نشان می‌دهد، به‌طوری که هر جزء نشان‌دهنده تأثیر سیستم از خرابی یک ژنراتور خاص است.

$$\overline{NLO} = \frac{\overline{LO}}{R} \quad (24)$$

$$\overline{NGO} = \frac{\overline{GO}}{R} \quad (25)$$

### • شاخص‌های آسیب‌پذیری ژنراتور

هنگامی که خرابی در یک خط  $k$  رخ می‌دهد، این ممکن است بر واحدهای تولیدی شبکه تأثیر بگذارد. بنابراین، باید اثرات اختلال بر ژنراتور  $g$  را به‌عنوان شاخص‌هایی ( $VIL_l^k = 1$ ) تعریف کنیم. این شاخص‌ها به توان فعال و راکتیو تولیدی ژنراتور  $g$  اشاره دارند. به این ترتیب، معادلات (۱۸) تا (۲۱) فرمولاسیون‌های این شاخص‌ها را ارائه می‌دهند که به شاخص‌های خرابی ( $VIG_g, VIQ_g$ ) مربوط به خط  $k$  و ژنراتور  $g$  بستگی دارند. علاوه بر این، لازم به ذکر است که شاخص آسیب‌پذیری که قبلاً بحث شد، می‌تواند برای شناسایی نقاط بحرانی میان واحدهای تولیدی بیشتر توسعه یابد.

$$G_g^k = \left( \frac{P_g^k - P_{normal,g}^k}{P_g^{max} - P_g^{min}} \right)^2 \times \quad (18)$$

$$\max \left[ \left( \frac{P_g^{min}}{P_g^k} \right)^2, \left( \frac{P_g^k}{P_g^{max}} \right)^2 \right]$$

$$Q_g^k = \left( \frac{Q_g^k - Q_{normal,g}^k}{Q_g^{max} - Q_g^{min}} \right)^2 \times \quad (19)$$

$$\max \left[ \left( \frac{Q_g^{min}}{Q_g^k} \right)^2, \left( \frac{Q_g^k}{Q_g^{max}} \right)^2 \right]$$

$$VIG_l^k = \begin{cases} 1 \rightarrow G_g^k > G_g^{basic} \\ 0 \rightarrow G_g^k < G_g^{basic} \end{cases} \quad (20)$$

$$VIQ_l^k = \begin{cases} 1 \rightarrow Q_g^k > Q_g^{basic} \\ 0 \rightarrow Q_g^k < Q_g^{basic} \end{cases} \quad (21)$$

همانطور که در معادله (۹) نشان داده شده است،  $\overline{LO}$  یک ماتریس منطقی است که شامل شاخص‌هایی برای ژنراتورها و خطوط است، با ترتیب غالب از چپ به راست. ( $B+L+G$ ) دارایی‌های شبکه نظیر باس‌ها، خطوط و ژنراتورها، و همچنین

$$NV = \sum_R NLO + NGO \quad (26)$$

در نهایت، هر دو شاخص خرابی خطوط و ژنراتور شبکه اجزای تابع هدف شاخص آسیب پذیری شبکه برق هستند. بنابراین، هدف اصلی این مقاله، به حداقل رساندن معادله (۲۶) است.

### ۲-۳- ساختار چند منطقه ای پیشنهادی

استفاده از ظرفیت یک سیستم چندمنطقه‌ای که در آن هر منطقه شامل یک ریزشکه و شبکه برق بالادستی است، می‌تواند تاب‌آوری شبکه برق را به‌طور چشمگیری افزایش دهد و آسیب‌پذیری آن را کاهش دهد. در این ساختار، هر منطقه به عنوان یک واحد مستقل از یک ریزشکه عمل می‌کند که به شبکه بالادستی متصل است. این ساختار چندمنطقه‌ای به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که هر ریزشکه با توجه به ویژگی‌های خاص خود از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تأمین نیازهای محلی استفاده می‌کند و به‌طور هماهنگ با شبکه بالادستی به تأمین بار در مقیاس بزرگ‌تر می‌پردازد.

ریزشکه‌های موجود در هر منطقه می‌توانند به‌صورت مستقل در زمان قطعی‌ها عمل کنند و یا با شبکه بالادستی به‌طور هماهنگ کار کنند. این ساختار غیرمتمرکز از گسترش اختلالات در یک بخش از شبکه جلوگیری کرده و می‌تواند از خاموشی‌های گسترده در مناطق مختلف پیشگیری کند. علاوه بر این، این نوع ساختار به‌واسطه سرعت پاسخ‌دهی بالا به تغییرات ناگهانی در عرضه یا تقاضای برق، موجب بهبود پایداری کلی شبکه می‌شود. به‌طور خاص، این سیستم‌ها قادر به شناسایی، ایزوله کردن و بازبایی از ضعف‌های موجود در شبکه به‌طور مؤثر هستند، که این امر مقاومت شبکه را در برابر تهدیدات خارجی مانند حملات سایبری یا بلایای طبیعی تقویت می‌کند.

در مناطقی که اتصال به شبکه برق اصلی ممکن است دشوار باشد، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند توربین‌های بادی (WT)، سیستم‌های فتوولتائیک (PV)، توربین‌های جزر و مد و واحدهای سلول سوختی برای تأمین بارهای توزیع‌شده پیشنهاد می‌شود. با این حال، به دلیل پراکندگی بار، تأمین کامل تقاضاهای بار در یک منطقه از طریق این واحدهای تولیدی دشوار است. به همین دلیل، سیستم چندمنطقه‌ای متشکل از چندین ریزشکه در هر منطقه طراحی می‌شود. هر ریزشکه در این سیستم به‌طور استراتژیک در مکانی قرار می‌گیرد که بارها و تقاضاهای انرژی منطقه را به‌طور مؤثر مدیریت کند. به‌علاوه، هر ریزشکه می‌تواند از منابع انرژی تجدیدپذیر مختلفی برخوردار باشد. برای هماهنگی بین ریزشکه‌ها و شبکه بالادستی، باید یک مرکز تصمیم‌گیری ایجاد شود که داده‌ها را از هر ریزشکه جمع‌آوری کرده و انرژی را بر اساس تعادل تولید و مصرف هر ریزشکه مدیریت کند. در این چارچوب، هر ریزشکه به‌طور مستقل از دیگران عمل کرده و می‌تواند انرژی مورد نیاز خود را تأمین کند و در صورت نیاز، انرژی را از یا به شبکه بالادستی یا سایر ریزشکه‌ها تبادل کند. این ساختار شامل اجزای مختلفی است که در طراحی سیستم به‌دقت در نظر گرفته می‌شود:

- **ریزشکه منطقه ۱:** شامل پنل‌های فتوولتائیک (PV)، واحدهای ذخیره‌سازی، دو توربین بادی جزر و مدی (TWS) و تقاضای بار است.
- **ریزشکه‌های مناطق ۲ و ۳:** هرکدام شامل دو توربین بادی جزر و مدی، یک سلول سوختی، واحدهای ذخیره‌سازی و تقاضای بار هستند.

این سیستم ریزشکه‌ای به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که علاوه بر تأمین نیازهای محلی، می‌تواند با شبکه بالادستی تعامل داشته باشد. هر ریزشکه به‌طور مؤثر می‌تواند انرژی را تبادل

$$PW_t = \begin{cases} 0 & 0 \leq w \leq w_{rated} \\ f(w_t) & w_{cutin} \leq w \leq w_{rated} \quad \forall t \in \Omega^T \\ P_{rated} & w_{rated} \leq w \end{cases} \quad (30)$$

$$PTI_t = \begin{cases} 0 & 0 \leq i_t \leq i_{rated} \\ 0.5P\gamma\lambda(i_t)^3 & i_{cutin} \leq i_t \leq i_{rated} \quad \forall t \in \Omega^T \\ PTI_{rated} & i_{rated} \leq i_t \end{cases} \quad (31)$$

$$PV_t = \frac{A \times E_t}{X} \times (1 - R^{loss}) \quad \forall t \in \Omega^T \quad (32)$$

$$FC_t = V_t^{FC} I_t^{FC} \quad \forall t \in \Omega^T \quad (33)$$

$$FC_t = V_t^{FC} I_t^{FC} + f(I_t^{FC})^2 \quad \forall t \in \Omega^T \quad (34)$$

$$EB_t = EB_{t-1} + PB_t \eta^{Bat} \quad \forall t \in \Omega^T \quad (35)$$

$$PB_t = PB_t^C - PB_t^D \quad \forall t \in \Omega^T \quad (36)$$

$$P^{min} \leq PB_t \leq P^{max} \quad \forall t \in \Omega^T \quad (37)$$

$$E^{min} \leq EB_t \leq E^{max} \quad \forall t \in \Omega^T \quad (38)$$

$$PTI_t^1 + \sum_{i=1}^{mw} PW_{t,i}^1 + PV_t^1 + PB_t^1 + P_t^{12} = P_t^{11} \quad \forall \quad (39)$$

$$\sum_{i=1}^m PTI_{t,i}^2 + \sum_{i=1}^{mw} PW_{t,i}^2 + PB_t^2 + FC_t^2 + P_t^{31} = P_t^{12} \quad \forall t \in \Omega^T \quad (40)$$

$$PB_t^3 + FC_t^3 + PV_t^3 + P_t^{23} = P_t^{13} \quad \forall t \in \Omega^T \quad (41)$$

کند و بارهای خود را با توجه به ظرفیت و محدودیت‌های شبکه بالادستی مدیریت کند. معادلات (۲۷) تا (۲۹) توابع هدف برای این ساختار چندمنطقه‌ای را تعریف می‌کنند که شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری و هزینه‌های ناشی از تبادل انرژی میان ریزشبکه‌ها و شبکه بالادستی هستند. معادلات (۳۰) تا (۳۳) فرمول‌های تولید برق برای هر یک از واحدهای انرژی تجدیدپذیر را مشخص می‌کنند. این تولید برق به عوامل مختلفی مانند سرعت باد برای توربین‌های بادی، جریان جزر و مد برای توربین‌های جزر و مد و میزان نور خورشید برای سیستم‌های فتوولتائیک بستگی دارد. به‌علاوه، هر واحد انرژی تجدیدپذیر شامل یک بخش ذخیره‌سازی برای مدیریت دینامیک بار است که در معادلات (۳۴) تا (۳۸) محدودیت‌های شارژ و دشارژ را مدل‌سازی می‌کند. در نهایت، معادلات (۳۹) تا (۴۱) محدودیت‌های تعادل تولید و مصرف برق برای هر ریزشبکه را مشخص می‌کنند. هر ریزشبکه باید تعادل بین تولید انرژی و تقاضای بار خود را رعایت کند. این تعادل شامل توان تولیدشده توسط واحدهای داخلی ریزشبکه و توان دریافتی از ریزشبکه‌های دیگر یا شبکه بالادستی است.

$$m^1 = \min \sum_{t \in \Omega^T} RT_t^1 PTI_t^1 + RPV_t^1 PV_t^1 + RB_t^1 PB_t^1 + \sum_{i=1}^{mw} RW_{t,i}^1 PW_{t,i}^1 + R_{12} P_t^{12} \quad (27)$$

$$m^2 = \min \sum_{t \in \Omega^T} \sum_{i=1}^m RT_{t,i}^2 PTI_{t,i}^2 + RFC_t^2 FC_t^2 + RB_t^2 PB_t^2 + \sum_{i=1}^{mw} RW_{t,i}^2 PW_{t,i}^2 + R_{13} P_t^{13} \quad (28)$$

$$m^3 = \min \sum_{t \in \Omega^T} \sum_{i=1}^{mw} RPV_{t,i}^3 PV_{t,i}^3 + R_{23} P_t^{23} + RFC_t^3 FC_t^3 + RB_t^3 PB_t^3 \quad (29)$$

### ۳- رویکرد حل توزیع‌شده مبتنی بر چندمنطقه‌ای

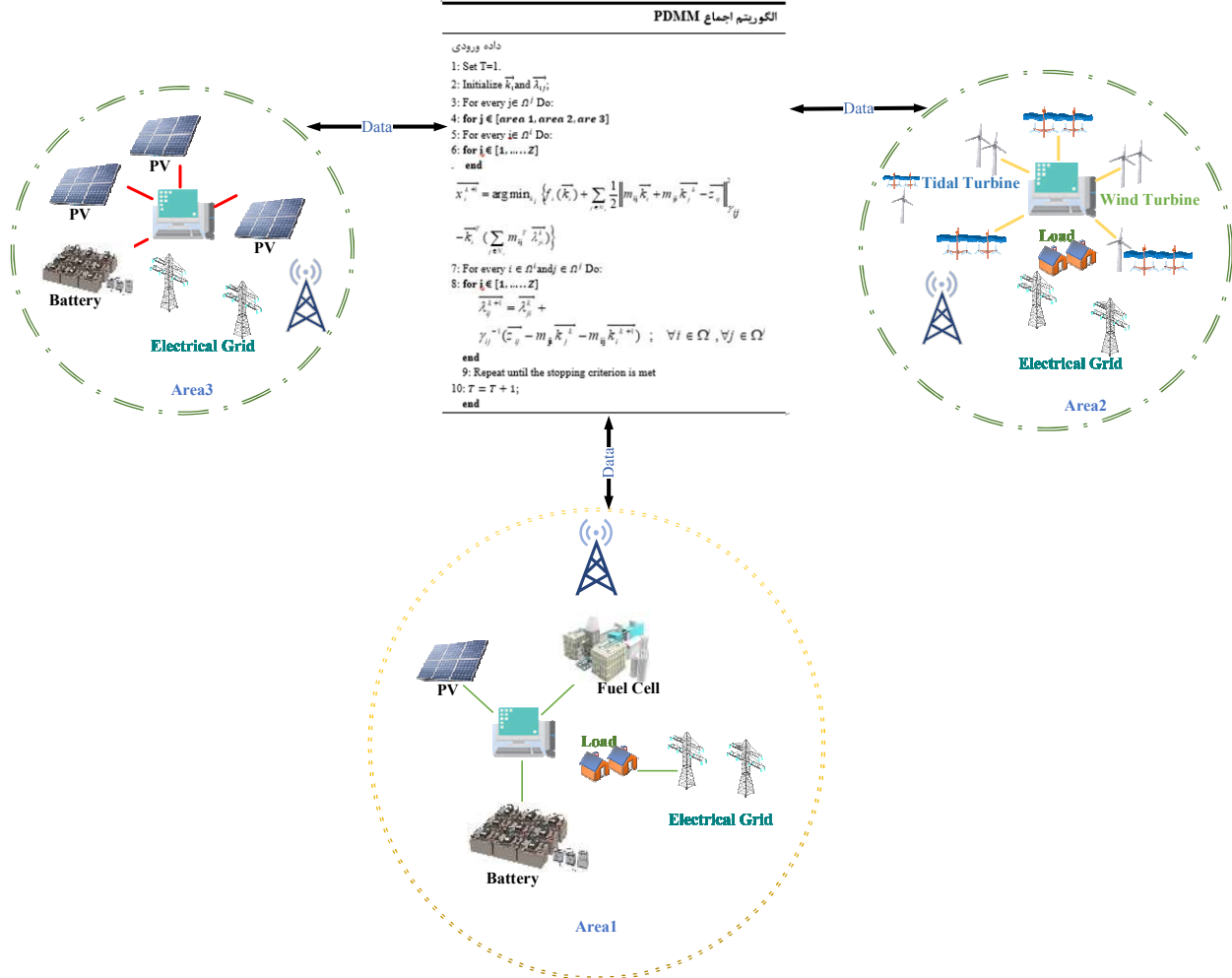
ریزشبکه‌ها به عنوان مناطق مستقل شناخته می‌شوند که می‌توانند به طور جداگانه از شبکه برق اصلی عمل کنند. برای مدیریت مؤثر این مناطق، استفاده از یک ساختار غیرمتمرکز توصیه می‌شود. این بخش توضیح می‌دهد که چگونه می‌توان

بالادستی خود هستند. هر منطقه به عنوان یک گره در گراف مدل سازی می شود که متغیرهای مربوط به ریزش شبکه ها و شبکه بالادستی آن در این گراف نمایان است. بنابراین، ساختار کلی این روش شامل حداقل کردن تابع  $\sum_{i \in V} f_i(k_i)$  است که یک تابع مقعر است زیرا گره ها در گراف مقادیر متغیر دارند که توسط  $k_i$  نمایش داده می شوند. در این مدل، هر گره (که نمایانگر یک منطقه است) می تواند با گره های مجاور (مناطق همجوار) خود تعامل کند. به این ترتیب، دو گره مجاور می توانند از طریق تابع لبه  $Z_{ij} = m_{ij}k_i + m_{ji}k_j$  با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. این ارتباط به گره ها این امکان را می دهد که تصمیمات بهینه را بر اساس وضعیت شبکه برق بالادستی و ریزش شبکه خود اتخاذ کنند.

از یک مرکز تصمیم گیری متمرکز عبور کرده و توافقی متقابل میان ریزش شبکه ها در چارچوب یک سیستم چند منطقه ای که شامل ریزش شبکه ها و شبکه برق بالادستی هر منطقه است، فراهم کرد. در این سیستم، هر منطقه شامل یک ریزش شبکه است که به طور مستقل و در عین حال در تعامل با شبکه برق بالادستی خود عمل می کند. برای مدیریت انرژی توزیع شده در چنین سیستمی، یک رویکرد توزیع شده مبتنی بر PDMM پیشنهاد می شود. شکل (۱) ساختار پیشنهادی چند منطقه ای را نشان می دهد.

### ۱-۳- ساختار مدیریتی مبتنی بر PDMM در چارچوب چند منطقه ای

روش PDMM یک الگوریتم اجماع مبتنی بر گراف است. در این رویکرد، فرض می شود که چندین منطقه (به تعداد  $n$ ) در سیستم وجود دارند، هر کدام شامل یک ریزش شبکه و شبکه برق



شکل (۱): ساختار چند منطقه ای پیشنهادی مبتنی بر ریزشبكة

هر ریزشبكة تبیین شده است. این تقسیم‌بندی به‌گونه‌ای طراحی شده که نواحی مختلف با اطلاعات محلی خود بتوانند تصمیم‌گیری کنند و تنها اطلاعات حیاتی با هم تبادل شود. سپس مراحل تکراری الگوریتم شامل به‌روزرسانی متغیرهای اولیه، اعمال ضرایب لاگرانژ، و به‌روزرسانی متغیرهای اشتراکی بین نواحی به تفکیک در جدول شرح داده شده است. هر گام از الگوریتم با هدف رسیدن به تعادل بین نواحی، کاهش تابع هدف کلی، و رعایت قیود بین‌ناحیه‌ای طراحی شده است. همچنین برای هر مرحله از الگوریتم، نمادهای ریاضی، تفسیر عملیاتی، و تأثیر آن بر همگرایی سیستم به صورت مجزا در توضیحات جدول آورده شده‌اند تا خواننده بتواند درک

$$\min_k \sum_{i \in \Omega^i} f_i(k_i) \quad (42)$$

s.t.

$$m_{ij} \bar{k}_i + m_{ji} \bar{k}_j = \bar{z}_{ij} \quad \forall i \in \Omega^i, \forall j \in \Omega^j$$

بردار متغیرها برای گره‌ها به صورت  $\bar{k}_i$  و  $\bar{k}_j$  برای مناطق  $i$  و  $j$  نمایان می‌شود. وضعیت هر منطقه (گره) بر اساس  $\bar{k}_i, \bar{\lambda}_{ij}$  تعیین می‌شود که از طریق روش PDMM با بررسی وضعیت گره‌های نزدیک به‌روزرسانی می‌شود. به‌روزرسانی‌ها زمانی خاتمه می‌یابد که تمام محدودیت‌های شبکه برق بالادستی و ریزشبكة‌ها برای هر منطقه برآورده شود. این فرآیند از طریق تکرار در روند همگرایی انجام می‌شود. ابتدا نحوه تقسیم مسئله بین نواحی مختلف و فرموله‌سازی زیرمسائل در سطح

چندمنطقه‌ای ریزشکه پشتیبانی می‌شود. در این روش، می‌توانیم عملکرد شبکه واقعی را ارزیابی کرده و تصمیمات به موقعی در تعامل با سیستم چندمنطقه‌ای اتخاذ کنیم تا تاب‌آوری آن بهبود یابد. بنابراین، بدون مشخص کردن یک مرکز تصمیم‌گیری متمرکز، استراتژی مدیریت انرژی مبتنی بر ساختار توزیع‌شده PDMM را پیاده‌سازی می‌کنیم. تبادل انرژی میان ریزشکه‌ها و شبکه بالادستی می‌تواند با استفاده از این روش‌شناسی تحلیل شود. در نتیجه، سه شبیه‌سازی ریزشکه ایجاد کرده‌ایم که بر اساس نوع منابع انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده، تغییر می‌کنند. منطقه ۱ شامل دو توربین جزر و مد، یک سلول سوختی، دو توربین جزر و مد، واحدهای ذخیره‌سازی، تقاضای بار و یک سیستم فتوولتائیک (PV) است. منطقه های ۲ و ۳ نیز شامل یک توربین جزر و مد، دو توربین جزر و مد، سیستم PV، واحدهای ذخیره‌سازی و تقاضای بار می‌باشند. قابل ذکر است که منابع [۲۵] و [۲۶] مشخصات فنی این ریزشکه‌ها را ارائه می‌دهند. سپس، کدی برای اتصال به خدمات ابری آمازون (ACS) ایجاد کردیم و مدل‌های فیزیکی این مطالعه موردی را با استفاده از یک چارچوب قابل دسترس که با Python، GAMS، MATLAB و Linux سازگار است، ساختیم. برای این منظور، از یک کامپیوتر با پردازنده ۷ هسته‌ای و ۶۴ گیگابایت حافظه RAM استفاده کردیم.

#### ۴-۱- تحلیل چارچوب چندمنطقه‌ای پیشنهادی با در نظر گرفتن تابع آسیب‌پذیری

سیستم چندمنطقه‌ای ریزشکه‌ای که بررسی شده، از سه ریزشکه تشکیل شده است که با منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر ساختار یافته‌اند و می‌توانند انرژی اضافی خود را با شبکه بالادستی تبادل کنند. بر اساس ظرفیت و انرژی ورودی که دریافت می‌کنند، هر منبع انرژی در یک سیستم چندمنطقه‌ای ریزشکه باید قادر به تأمین بار مورد نیاز باشد.

دقیق‌تری از سازوکار اجرای الگوریتم در محیط توزیع‌شده به‌دست آورد. در نهایت، ماتریس نمایانگر ساختار متصل، شامل  $m_{ij}, m_{ji}$  همراه با وضعیت‌های تخمینی از تکرار  $T$ ، برای به‌روزرسانی وضعیت هر منطقه (گره) در تکرار  $T+1$  استفاده می‌شود. در این رویکرد، رسیدن به اجماع مؤثر میان تمامی مناطق برای پایان دادن به فرآیند به‌روزرسانی و اتخاذ تصمیمات بهینه بسیار حیاتی است. در چارچوب یک سیستم چندمنطقه‌ای که شامل ریزشکه‌ها و شبکه بالادستی هر منطقه است،

#### الگوریتم اجماع PDMM

داده ورودی

1: Set  $T=1$ .

2: Initialize  $\bar{k}_i$  and  $\bar{\lambda}_{ij}$ ;

3: For every  $j \in \Omega^j$  Do:

4: for  $j \in \{\text{area 1, area 2, are 3}\}$

5: For every  $i \in \Omega^i$  Do:

6: for  $i \in \{1, \dots, Z\}$

end

$$x_i^{k+1} = \arg \min_{k_i} \left\{ f_i(k_i) + \sum_{j \in N_i} \frac{1}{2} \left\| m_{ij} k_i + m_{ji} k_j^k - z_{ij} \right\|_{\gamma_{ij}}^2 \right.$$

$$\left. -k_i \left( \sum_{j \in N_i} m_{ij}^T \lambda_{ij}^k \right) \right\}$$

7: For every  $i \in \Omega^i$  and  $j \in \Omega^j$  Do:

8: for  $i \in \{1, \dots, Z\}$

$$\lambda_{ij}^{k+1} = \lambda_{ij}^k +$$

$$\gamma_{ij}^{-1} (z_{ij} - m_{ij} k_j^k - m_{ji} k_i^{k+1}); \quad \forall i \in \Omega^i, \forall j \in \Omega^j$$

end

9: Repeat until the stopping criterion is met

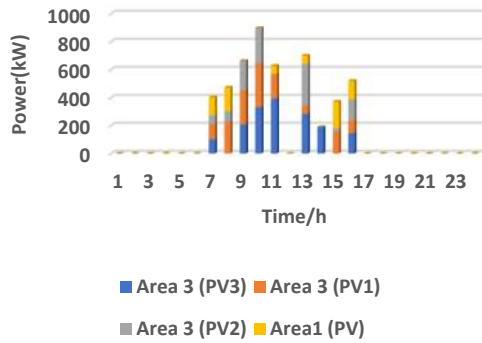
10:  $T = T + 1$ ;

end

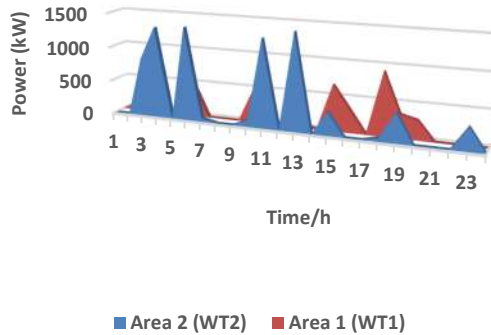
رویکرد PDMM می‌تواند به صورت مؤثری به مدیریت توزیع‌شده انرژی و کاهش وابستگی به سیستم‌های مرکزی کمک کند. این سیستم به هر منطقه این امکان را می‌دهد که به طور مستقل از یکدیگر و در عین حال هماهنگ با شبکه بالادستی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و تولید را انجام دهد.

#### ۴- شبیه‌سازی و ارزیابی

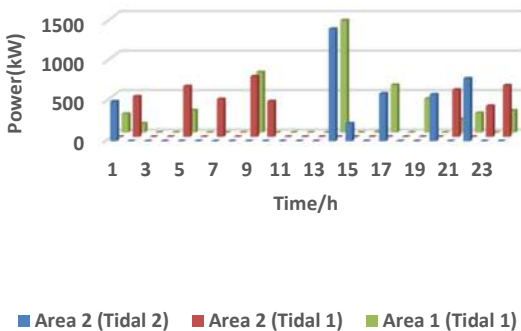
ما از تحلیل‌های زمان واقعی برای ارزیابی و بهبود آسیب‌پذیری شبکه برق استفاده می‌کنیم که از یک سیستم



شکل (۲): منحنی های توان خروجی سلول های خورشید در مناطق



شکل (۳): منحنی های توان خروجی توربین های بادی در مناطق



شکل (۴): منحنی های توان خروجی سیستم های جزر و مد در مناطق

در این بخش، سیستم مورد نظر را با در نظر گرفتن شبکه بالادستی برای هر منطقه در یک سیستم چند منطقه‌ای

هر منبع انرژی مانند خورشیدی، بادی یا زیست‌توده، انرژی تولید می‌کند که بستگی به تعدادی از متغیرها دارد، از جمله کارایی تبدیل انرژی تکنولوژی و محیط اطراف. برای تضمین اینکه تقاضای بار به طور مداوم تأمین می‌شود، هر ریزشکه در سیستم باید بتواند منابع انرژی خود را به طور مؤثر مدیریت کند. به همین دلیل، دانستن توان تولیدی هر منبع انرژی برای بهینه‌سازی سیستم ضروری است. توان تولیدی هر منبع انرژی تجدیدپذیر در هر منطقه در شکل‌های (۲) تا (۴) به همراه توزیع سهم‌های فردی آن‌ها نشان داده شده است. هر سیستم PV در شکل (۲) بسته به دو عامل مختلف عمل می‌کند: بار مربوط به ریزشکه و تابش خورشیدی. در ارتباط با تابش خورشیدی ورودی به سیستم‌های PV، توان خروجی هر ریزشکه بین ۶ تا ۱۷ تنظیم شده است. به دلیل بار کمتر نسبت به سایر ریزشکه‌ها، سیستم PV در ریزشکه ۱ توان کمتری تولید کرده است، همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود.

توان خروجی سیستم‌های توربین بادی (WT) در مناطق ۱، ۲ در طول ۲۴ ساعت در شکل (۳) نمایش داده شده است. منطقه ۲ نسبت به سایر مناطق، سهم بیشتری در توان خروجی سیستم‌های توربین بادی داشت. شکل (۴) عملیات سیستم‌های توربین جزر و مد را نشان می‌دهد. این تحلیل‌ها می‌توانند بر اساس چارچوب یک سیستم چندمنطقه‌ای که شامل یک ریزشکه و شبکه بالادستی هر منطقه است، اصلاح شوند. در این چارچوب، هر منطقه نه تنها منابع تجدیدپذیر خود را مدیریت می‌کند بلکه به تبادل انرژی با شبکه بالادستی منطقه‌اش نیز می‌پردازد. با این رویکرد، می‌توان تعاملات پیچیده میان ریزشکه‌ها و شبکه بالادستی در سطح منطقه‌ای را به‌طور دقیق‌تر مدل‌سازی و تحلیل کرد.

ریزشبکه‌ها تحلیل خواهیم کرد. این تحلیل در سه سناریو انجام می‌شود: سناریو (۱) خروج نیروگاه ها، (۲) خروج خط و باسبار به طور همزمان و (۳) خروج نیروگاه و خط به طور همزمان. شکل های (۵) تا (۷) نتایج مقایسه‌ای را در خصوص شاخص های آسیب‌پذیری مربوط به باسبار، خطوط و نیروگاه در سه سناریو نشان می‌دهد.

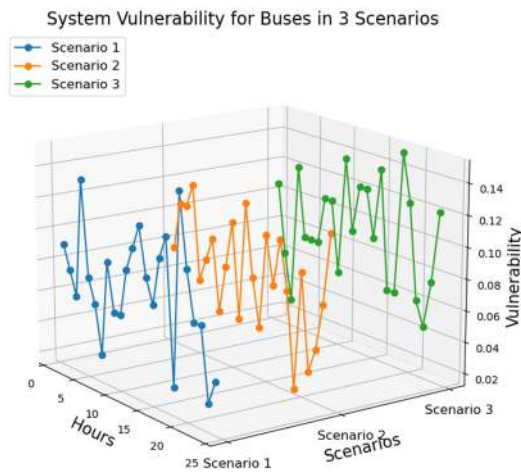
در شکل (۵)، شاخص‌های آسیب‌پذیری شبکه قدرت نشان‌دهنده حساسیت باس‌بارها به وقوع خطاهای مختلف در سه سناریوی اصلی است: خروج نیروگاه‌ها، خروج خط و باس‌بار به‌طور همزمان، و خروج نیروگاه و خط به‌طور همزمان. تحلیل داده‌های ارائه‌شده نشان می‌دهد که سناریوی خروج نیروگاه‌ها تأثیر قابل توجهی بر برخی باس‌بارها دارد، به‌ویژه آن‌هایی که مستقیماً به منابع تولید انرژی متصل هستند. در این سناریو، باس‌بارهایی که شاخص آسیب‌پذیری بالاتری دارند، احتمالاً به دلیل نزدیکی به نقاط تولید یا اهمیت آن‌ها در تأمین بارهای حیاتی سیستم است. در سناریوی دوم، یعنی خروج همزمان خط و باس‌بار، پراکندگی شاخص آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد، که بیانگر تأثیر چندگانه خطاها بر شبکه است. این سناریو به‌ویژه در باس‌بارهای بینابینی و آن‌هایی که ارتباطات شبکه را حفظ می‌کنند، اثرات شدیدی را نشان می‌دهد. در سناریوی سوم، یعنی خروج نیروگاه و خط به‌طور همزمان، نتایج نشان می‌دهد که سیستم در برابر این ترکیب بسیار حساس‌تر است. باس‌بارهایی که در هر سه سناریو شاخص‌های بالایی دارند، احتمالاً به‌عنوان نقاط بحرانی شبکه شناسایی می‌شوند. میانگین و پراکندگی شاخص‌ها در این داده‌ها نشان‌دهنده نیاز به راهکارهایی برای کاهش تأثیرات این سناریوها، مانند توزیع بهینه منابع و طراحی مناسب ریزشبکه‌ها است. برای شاخص آسیب‌پذیری خطوط در سه سناریوی خروج نیروگاه‌ها، خروج خط و باس‌بار همزمان، و خروج نیروگاه و خط همزمان در شکل (۶) تحلیل شده‌اند. در

سناریوی اول، شاخص آسیب‌پذیری خطوط بحرانی مانند خطی با مقدار ۰.۲۸۷۹ بالاترین مقدار را در میان خطوط دیگر نشان می‌دهد. این مقدار حاکی از اهمیت این خط در ساختار شبکه و نقش حیاتی آن در تأمین انرژی است. خطوط با شاخص‌های بالاتر از ۰.۲ مانند ۰.۲۴۲۴ نیز نقش بحرانی داشته و احتمالاً در نزدیکی مناطق تولید یا در مسیرهای اصلی انتقال قرار دارند. در سناریوی دوم، خروج همزمان خط و باس‌بار، شاخص‌هایی مانند ۰.۲۵۷۶ و ۰.۲۲۷۲ اهمیت روابط میان بخش‌های مختلف شبکه را نشان می‌دهند. با در نظر گرفتن شاخص‌های آسیب‌پذیری در هر سه سناریوی اصلی، می‌توان دریافت که آسیب‌پذیری شبکه قدرت نه‌تنها وابسته به عناصر منفرد (مانند یک خط یا یک باس‌بار خاص) بلکه به نحوه اتصال و تعامل اجزا با یکدیگر در ساختار شبکه بستگی دارد. به‌عبارت دیگر، توپولوژی شبکه نقش تعیین‌کننده‌ای در گسترش یا مهار خطاها دارد. به‌ویژه در ساختارهای چندمنطقه‌ای که از چند ریزشبکه مستقل یا نیمه‌مستقل تشکیل شده‌اند، میزان وابستگی هر منطقه به منابع بیرونی یا خطوط مشترک، به‌صورت مستقیم در شاخص‌های آسیب‌پذیری منعکس می‌شود.

در این چارچوب، وقتی نیروگاهی از مدار خارج می‌شود، چنانچه منبع تغذیه جایگزینی در همان منطقه یا در ساختار ریزشبکه داخلی وجود نداشته باشد، بار این اختلال به خطوط انتقال منتقل می‌شود که منجر به افزایش بار و در نتیجه افزایش احتمال وقوع خطاهای ثانویه در سایر نقاط شبکه خواهد شد. این پدیده به‌وضوح در مقادیر شاخص‌های شکل (۵) مشاهده می‌شود، جایی که برخی باس‌بارها در هر سه سناریو دچار شاخص‌های بالای آسیب‌پذیری هستند.

از سوی دیگر، تحلیل شکل (۶) نشان می‌دهد که خطوطی که در انتقال انرژی بین مناطق مختلف نقش کلیدی دارند، در تمامی سناریوها مقادیر بالایی از شاخص آسیب‌پذیری را به

نیروگاه‌های دارای مقادیر بالاتر نه تنها از لحاظ مکانی و توان تولید، بلکه از دیدگاه تاثیرگذاری در پایداری شبکه، نقشی حیاتی دارند. نیروگاه‌هایی با شاخص آسیب‌پذیری بالا احتمالاً در شبکه نزدیک به تقاطع‌های مهم و بخش‌های پرتراکم مصرف یا تولید قرار دارند. این تحلیل نشان می‌دهد برای بهبود پایداری، لازم است رویکردهایی مانند توزیع بار پویا و بازطراحی شبکه برای کاهش فشار روی نیروگاه‌های آسیب‌پذیر اعمال شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود نیروگاه‌هایی با شاخص بالا به استراتژی‌های تقویت یا بهره‌برداری پیشرفته، مانند ریزشکبه‌ها، مجهز شوند تا خطرات ناشی از وقایع غیرمترقبه کاهش یابد. این نتایج زمینه‌ای برای بهینه‌سازی و افزایش امنیت انرژی در سطوح مختلف شبکه فراهم می‌کند.

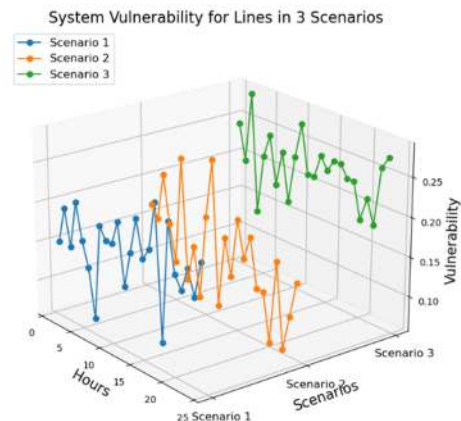


شکل (۵): شاخص آسیب‌پذیری باسبارهای سیستم چند منطقه‌ای به ازای سه سناریو مختلف برای ۲۴ یک‌افق ۲۴ ساعته

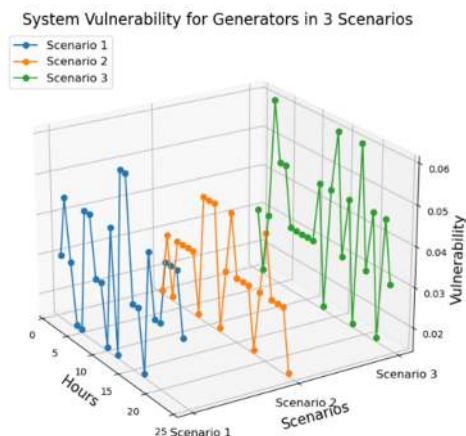
خود اختصاص داده‌اند. به‌خصوص خطوطی که در ساختار شبکه به‌عنوان مسیرهای اصلی بین ریزشکبه‌ها یا مناطق تولید و مصرف شناخته می‌شوند، در صورت وقوع خطا تأثیر چندجانبه‌ای روی عملکرد کل سیستم دارند. این یافته تأکید می‌کند که صرفاً تقویت یک نقطه از شبکه بدون در نظر گرفتن وابستگی‌های ساختاری کافی نیست؛ بلکه باید طراحی شبکه به‌گونه‌ای باشد که در برابر خطاهای هم‌زمان چندعنصری نیز تاب‌آوری لازم را داشته باشد. در این میان، ایجاد ریزشکبه‌هایی با قابلیت عملکرد مستقل به‌عنوان یکی از راهکارهای مهم در کاهش شاخص‌های آسیب‌پذیری پیشنهاد می‌شود. چنین ریزشکبه‌هایی در شرایط بحرانی می‌توانند به‌طور موقت از شبکه اصلی جدا شده و نیاز انرژی بارهای حیاتی را از منابع محلی یا ذخیره‌سازی انرژی تأمین کنند. این رویکرد نه تنها احتمال انتشار اختلال را کاهش می‌دهد، بلکه شاخص‌های عملکردی سیستم در شرایط بحرانی را نیز بهبود می‌بخشد.

این نتایج تأکید می‌کنند که خطوط آسیب‌پذیر، نه تنها باید در برابر خطاهای داخلی مقاوم باشند، بلکه ارتباطاتشان با باس‌بارها نیز نقش مهمی در پایدار ماندن شبکه دارد. در سناریوی سوم، شاخص‌هایی مانند ۰.۲۷۲۷ بیانگر آسیب‌پذیری شدیدتر سیستم در برابر این شرایط پیچیده است. بر اساس آنچه که در شکل (۷) میتوان تحلیل نمود این است که شاخص آسیب‌پذیری نیروگاه‌ها در سه سناریو مورد بررسی قرار گرفته است. در این ماتریس‌ها، نیروگاه‌هایی با شاخص‌هایی مانند ۰.۰۶ در موقعیت‌های بحرانی‌تر قرار دارند و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان اجزای کلیدی شبکه شناسایی کرد. نیروگاه‌هایی با مقدار ۰.۰۴۵۴ نیز آسیب‌پذیری متوسطی دارند و نشان‌دهنده حساسیت آن‌ها نسبت به اختلال‌های شبکه است. در حالی که نیروگاه‌هایی با شاخص‌های کمتر از ۰.۰۳، مانند ۰.۰۱۵، در مقایسه با دیگر نیروگاه‌ها آسیب‌پذیری کمتری دارند. این نتایج حاکی از آن است که

اینجا نحوه عملکرد روش PDMM برای رفع نگرانی‌ها در مورد سیستم‌های کنترل انرژی ریزشکبه‌ها که به طور مستقل برای دستیابی به اهداف خود عمل می‌کنند، توضیح داده می‌شود. به منظور نمایش و ارزیابی نتایج شبیه‌سازی برای سه ریزشکبه، ابتدا پیاده‌سازی زیرساخت توزیع شده فیزیکی را توضیح خواهیم داد. برای اجرای زیرساخت فیزیکی سیستم چند منطقه‌ای ریزشکبه‌ها، ابتدا سیستم مورد مطالعه و الگوریتم توزیع PDMM را بر روی نرم‌افزارهای MATLAB و GAMS پیاده‌سازی می‌کنیم. پس از اجرای سیستم، نتایج همگرایی که گاهی از طریق توزیع انرژی بین منطقه‌ها به دست آمد، شرح داده خواهد شد. در این راستا، منحنی‌های فرایند همگرایی برای تراکنش توان بین مناطق ۱، ۲ و ۳ و شبکه بالادستی در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است. مهم است که توجه داشته باشیم که گیرنده با مقدار مثبت تراکنش توان در منحنی‌ها نمایش داده می‌شود، در حالی که ارسال‌کننده با مقدار منفی نمایش داده می‌شود. بر اساس فرایند به‌روزرسانی، مناطق سعی خواهند کرد تفاوت‌های موجود بین  $\lambda^k, \lambda^{k+1}$  را تا ۱۵۰ تکرار کاهش دهند. به دلیل کمبود اطلاعات و عدم تعادل انرژی در هر منطقه، همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است، منطقه ۱ و منطقه ۲ در ابتدا در زمان  $t=4$  در تضاد عمل می‌کردند. شکل (۸) نتیجه شبیه‌سازی اجرای روش PDMM بین منطقه ۱ و منطقه ۲ را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، می‌توان استنباط کرد که ریزشکبه‌ها به اجماع رسیدند که منطقه ۱ متعهد به انتقال توان ۰ به منطقه ۲ در  $t=4$  شد. منحنی همگرایی در طول فرایند تکراری به یک سطح تقریباً صاف رسید و در نهایت به روشی برای تطبیق معاملات انرژی رسیدند. همچنین، بر اساس شکل (۹)، منطقه ۲ در  $t=4$  به توافق رسید که توان ۳۰۰ کیلوواتی را با شبکه منتقل کند. علاوه بر این، در شکل (۱۰)، منحنی همگرایی بین منطقه ۳



شکل (۶): رفتار اثر گذاری رخداد سه سناریو مختل خطوط در سیستم

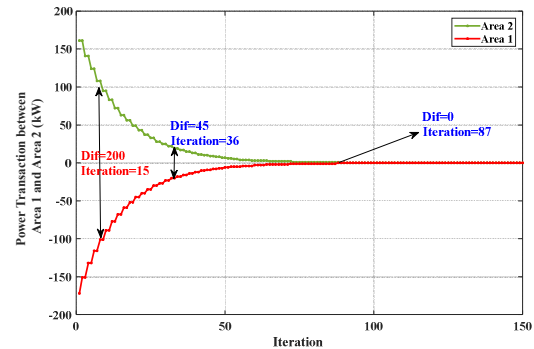


شکل (۷): عملکرد تولیدی نیروگاه‌های موجود در سه منطقه در شرایط رخداد سه سناریو مختلف

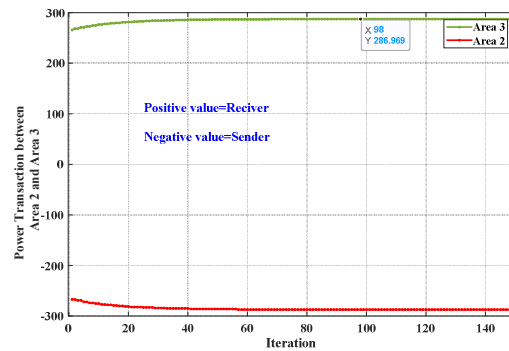
## ۴-۲- تحلیل روش PDMM برای چارچوب چند منطقه‌ای ریزشکبه‌ها

مهم است که قبل از ارزیابی عملکرد سیستم ریزشکبه‌ها در چارچوب چند منطقه‌ای، عملکرد روش توزیع شده PDMM در سیستم ریزشکبه‌های واقعی بررسی شود. به طور ساده، در

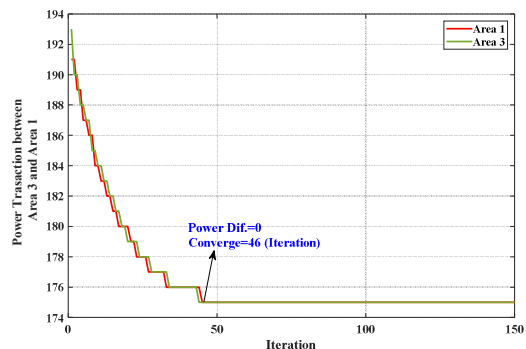
و منطقه ۱ نشان می‌دهد که در  $t=4$ ، این ریزش‌بکه‌ها در تبادل ۱۷۵ کیلووات قدرت مشابه بودند.



شکل (۸): روند همگرایی توان انتقالی بین دو منطقه ۱ و ۲ در ساعت ۴



شکل (۹): تبادل توان بین دو منطقه ۲ و ۳ که ارزش مثبت نشان‌دهنده دریافت توان و ارزش منفی نشان‌دهنده ارسال توان می‌باشد.



شکل (۱۰): روند همگرایی ۱۵۰ تکرار تبادل توان بین دو منطقه ۱ و ۲

همانطور که در جدول (۲) می‌توان مشاهده نمود، هر منطقه به شبکه بالادستی خود متصل است، شاخص آسیب‌پذیری NV از ۲۱.۲۴۲ به ۲۰.۳۷۹ کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود تاب‌آوری سیستم است. این کاهش در شاخص آسیب‌پذیری با کاهش هزینه‌های کل سیستم همراه بوده و نشان‌دهنده اثربخشی تدابیر بهینه‌سازی منابع انرژی و افزایش امنیت سیستم است. در این سناریو، هر منطقه می‌تواند با توجه به منابع انرژی خود و شبکه بالادستی مربوطه، انرژی مورد نیاز خود را تأمین کرده و از تعامل بهینه با سایر مناطق بهره‌برداری کند. در روش پیشنهادی، شاخص آسیب‌پذیری NV افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده کاهش تاب‌آوری سیستم و افزایش معرض به ریسک‌ها است. در این حالت، هزینه‌های سیستم نیز افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش بهره‌وری است. این نتایج بر اهمیت مدیریت بهینه تعاملات میان مناطق تأکید دارد و نشان می‌دهد که اتصال هر منطقه به مناطق دیگر به صورت توزیع شده می‌تواند تاب‌آوری سیستم را افزایش دهد در حالی که هزینه‌ها یا یک اختلاف کم با روش متمرکز به عنوان مرجع برابر است. تحلیل مقایسه‌ای این دو روش می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد چگونگی تأثیر تنظیمات استراتژیک در افزایش تاب‌آوری و کاهش هزینه‌ها در سیستم‌های چند منطقه‌ای ریزش‌بکه‌ای فراهم کند.

جدول (۲): آنالیز مقایسه‌ای عملکرد ساختار پیشنهادی بر اساس شاخص‌های آسیب‌پذیری و هزینه با روش متمرکز به عنوان یک مرجع

متغیر	توزیع شده (پیشنهادی)	متمرکز	
آنالیز آسیب‌پذیری	NV	۲۰.۳۷	۲۱.۲۴
هزینه/سود هر منطقه	منطقه ۱	-۷۵۲۵۲.۲۵	-۷۵۰۹۴.۶۳
	منطقه ۲	۱۴۱۱۶۹.۸۷	۱۳۳۹۹۱.۷
	منطقه ۳	۱۱۸۹۸۷.۱	۱۲۰۶۱۳.۵۷
هزینه کل	هزینه	$۷.۰۰۶۹ \times 10^9$	$۷.۰۱۶۸ \times 10^9$

#### ۵- نتیجه‌گیری

- **A. Mehdizadeh**, N. Taghizadegan. "Robust optimisation approach for bidding strategy of renewable generation-based microgrid under demand side management." *IET Ren. Power Gen.* vol.11, no. 11, pp. 1446-1455, 2017.
- **Abedi**, Amin, Mohammad Reza Hesamzadeh, and Franco Romerio. "An ACOPF-based bilevel optimization approach for vulnerability assessment of a power system." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 125 (2021): 106455.
- **Mohamed**, Mohamed A., et al. "Proactive resilience of power systems against natural disasters: A literature review." *IEEE Access* 7 (2019): 163778-163795.
- **Sun, Y.**, Wu, J., Zhang, J., Xiong, Y., Liu, X., & Bai, Y. (2024). Scenario construction and vulnerability assessment of natural hazards-triggered power grid accidents. *Journal of Safety Science and Resilience*, 5(4), 498-511.
- **Baba, M.**, Nor, N. B. M., Shiekh, M. A., Alharthi, Y. Z., Shutari, H., & Majeed, M. F. (2024). A Review on Microgrid Protection Challenges and Approaches to Address Protection Issues. *IEEE Access*.
- **S. A. Arefifar**, Y. A.-R. I. Mohamed, and T. El-Fouly, "Optimized multiple microgrid-based clustering of active distribution systems considering communication and control requirements," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 2, pp. 711–723, Feb. 2015.
- **M. D. Ilic**, "From hierarchical to open access electric power systems," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 5, pp. 1060–1084, May 2007.
- **M. Marzband**, N. Parhizi, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero, "Distributed smart decision-making for a multi-microgrid system based on a hierarchical interactive architecture," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no. 2, pp. 637–648, Apr. 2016.
- **T. Fang and R. Lahdelma**, "Optimization of combined heat and power production with heat storage based on sliding time window method," *Applied Energy*, vol. 162, pp.723-732, 2016.
- **Rohmingtuanga**, C., Subir Datta, Nidul Sinha, Ksh Robert Singh, Subhasish Deb, Umit Cali, and Taha Selim Ustun. "Enhanced harris hawks optimization based load frequency control of multi area microgrid based water treatment plant with consideration of 3DOF-(FO-PIDN)/(TIDN) controller." *Frontiers in Energy Research* 12 (2024): 1387780.
- **Hongesombut**, Komsan, Ruangyos Keteruksa, Dirk Turschner, and Ines Hauer. "Optimal Tuning for Virtual Inertia Control and Fopid Controller Based on Multi-Area Interconnected Microgrid Power System Using Mofpa." Available at SSRN 4829087.
- **N. Nikmehr** and S. N. Ravadanegh, "Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1648-1657, 2015.
- **Y. Liu et al.**, "Distributed robust energy management of a multi-microgrid system in the real-time energy market," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, pp. 396 - 406, 2017.

این مقاله تحلیلی توزیع شده از انرژی را برای یک سیستم چند ریزشکه‌ای مبتنی بر چارچوب چند منطقه‌ای ارائه می‌دهد که در آن هر منطقه شامل یک ریزشکه و شبکه بالادستی است. هدف اصلی این کار (۱) دستیابی به اجماع انرژی بین ریزشکه‌ها و شبکه بالادستی با استفاده از الگوریتم توزیع شده PDMM و (۲) ارزیابی عملکرد سیستم در شرایط مختلف است. بر اساس مدل شبیه‌سازی، نتایج به دست آمده با هدف دستیابی به این اهداف ارائه شده است. شاخص آسیب‌پذیری سیستم از ۲۰.۳۷۹ به ۲۱.۰۱۵ کاهش یافت که نشان‌دهنده افزایش تاب‌آوری سیستم است. هزینه‌های کلی نیز به دلیل اجرای مؤثر اقدامات برای تقویت امنیت سیستم و بهینه‌سازی منابع انرژی کاهش یافت. از طرف دیگر، در صورتی که اجماع انرژی به درستی بین مناطق برقرار نشود، شاخص آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش سازگاری یا افزایش معرض‌پذیری به خطرات است. همراه با این افزایش، هزینه‌های سیستم نیز افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده ناتوانی‌ها یا نیاز به استراتژی‌های مدیریت ریسک قوی‌تر است. چارچوب پیشنهادی می‌تواند رفتار مناطق در هم‌افزایی انرژی را پیش‌بینی کند که در تغییرات جزئی برای مناطق مختلف به طور متفاوت قابل مشاهده است.

## مراجع

- **M. Geidl**, G. Koepfel, P. Favre-Perrod, B. Klöckl, G. Andersson, and K. Fröhlich, "Energy Hubs for the futures", *IEEE Power & Energy Magazine*, vol.5, no.1, 2007, pp.24–30.
- **Z. Xiaping**, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab, and A. Abusorrah. "Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures." *IEEE Trans. Smart Grid* vol. 6, no. 5 pp.2302-2311, 2015.
- **A. Dolatabadi**, B. Mohammadi-Ivatloo. "Stochastic risk-constrained scheduling of smart energy hub in the presence of wind power and demand response." *Applied Thermal Engineering* vol.123, pp. 40-49, 2017.
- **M. Roustai**, M. Rayati, A. Sheikhi, and A.M. Ranjbar, "A scenario-based optimization of Smart Energy Hub operation in a stochastic environment using conditional-value-at-risk," *Sustainable cities and society*, vol. 39, pp. 309-316, 2018.

- **G. Wen**, X. Yu, Z.-W. Liu, and W. Yu, "Adaptive consensus-based robust strategy for economic dispatch of smart grids subject to communication uncertainties," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 6, pp. 2484-2496, 2017.
- **T.-H. Chang**, M. Hong, and X. Wang, "Multi-agent distributed optimization via inexact consensus ADMM," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 63, no. 2, pp. 482-497, 2014.
- **F. Guo**, C. Wen, J. Mao, and Y.-D. Song, "Distributed economic dispatch for smart grids with random wind power," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1572-1583, 2015.
- **G. Zhang** and R. Heusdens, "Distributed optimization using the primal-dual method of multipliers," *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, vol. 4, no. 1, pp. 173-187, 2018.
- **M. Mohiti**, H. Monsef, M. Mazidi, A. Anvari-Moghaddam, and J. M. Guerrero, "A decentralized model for coordinated operation of distribution network and EV aggregators," in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, 2018, pp. 1-6: IEEE.
- **Yuan, Yi**, Tao Ding, Xinyue Chang, Wenhao Jia, and Yixun Xue. "A distributed multi-objective optimization method for scheduling of integrated electricity and hydrogen systems." *Applied Energy* 355 (2024): 122287.
- **Yin, Linfei**, and Zhixiang Sun. "Multi-layer distributed multi-objective consensus algorithm for multi-objective economic dispatch of large-scale multi-area interconnected power systems." *Applied Energy* 300 (2021): 117391.
- **Sheikh**, Morteza, Jamshid Aghaei, Hossein Chabok, Mahmoud Roustaei, Taher Niknam, Abdollah Kavousi-Fard, Miadreza Shafie-Khah, and João PS Catalão. "Synergies Between Transportation Systems, Energy Hub and the Grid in Smart Cities." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2021).
- **Ding**, Shenghong, Yue Cao, Mahdi Vosoogh, Morteza Sheikh, and Alaa Almagrabi. "A directed acyclic graph based architecture for optimal operation and management of reconfigurable distribution systems with PEVs." *IEEE Transactions on Industry Applications* (2020).