



Semnan University



Research Article

Examining the Role of Energy Storage Systems on the Resilience, Reliability and Economic Performance of Microgrids

Shaghayegh Nayebi ^a, Ebrahim Afjei ^{b,*}

^a Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-12-09

Revised: 2024-07-05

Accepted: 2024-08-17

Keywords:

Microgrid;
Energy storage system;
Energy management;
Resilience;
Reliability.

ABSTRACT

Energy storage systems (ESSs) can be installed in microgrids and used for reserving and feeding loads. These systems provide a wide range of applications to the power grid, such as reducing the problems of fluctuating and outages of renewable energy sources, load compliance, voltage and frequency stability, peak load management and improving power quality. Also, as production resources in daily planning, a lot of profit is obtained from the energy exchange of the microgrid with the main grid. Considering the high investment costs of ESS, in this article, to justify the economy and prevent its under- or over-utilization, a precise model is presented to determine the optimal size of the storage device. Moreover, to consider the uncertainties of the photovoltaic system, wind turbine, and electric loads, Monte Carlo simulation has been used to generate scenarios and the K-means algorithm to reduce them. However, in order to find a solution to reduce the grid vulnerability and improve its technical and economic performance, it is crucial to pay attention to reliability and resilience. ESSs lead to better energy management during peak hours and when disturbances occur. The model presented in this article examines the role of ESS in energy systems to reduce operating costs, and improve network resilience and reliability. Resilience measure that is used to reduce the effects of severe incidents on the network is considered as a term of the objective function. The system reliability index, which is to ensure the reliable operation of the network against small errors and short-term failures, is proposed as a constraint in the model. An accurate and practical ESS model improves the performance of the system in terms of economy and security, and the simulation results show the efficiency of the presented model.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32617.2579>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: afjei@yahoo.com

How to cite this article:

Nayebi, S. and Afjei, S. E. (2025). Examining the role of energy storage systems on the resilience, reliability and economic performance of microgrids. Journal of Modeling in Engineering, 23(80), 251-268. doi: 10.22075/jme.2024.32617.2579

بررسی حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی روی تاب‌آوری، قابلیت اطمینان و عملکرد اقتصادی ریزشکها

شقایق ناییبی^۱، ابراهیم افجه‌ای^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸	
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۵	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷	
واژگان کلیدی:	
ریزشکها، ذخیره‌ساز انرژی، مدیریت انرژی، تاب‌آوری، قابلیت اطمینان.	سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی (ESS) می‌توانند در ریزشکها نصب شوند و تأمین بار و رزرو را بر عهده بگیرند. این سیستم‌ها کاربردهای گسترده‌ای را به شبکه‌ی قدرت مانند کاهش مشکلات نوسان و قطعی منابع انرژی تجدیدپذیر، تبعیت از بار، پایداری ولتاژ و فرکانس، مدیریت بار پیک و بهبود کیفیت توان سیستم ارایه می‌کنند. با توجه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالای ESS، در این مقاله برای توجیه اقتصادی و جلوگیری از بهره‌برداری کم یا بیش از حد آن، مدلی دقیق برای تعیین اندازه بهینه‌ی ذخیره‌ساز ارائه شده است. همچنین برای لحاظ کردن عدم قطعیت‌های سیستم فوتوولتائیک، توربین بادی و بارهای الکتریکی، از شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید سناریوها و الگوریتم K-means برای کاهش آن‌ها استفاده شده است. از طرفی جهت یافتن راهکاری برای کاهش آسیب‌پذیری شبکه و بهبود عملکرد فنی و اقتصادی آن، توجه به مسئله قابلیت اطمینان و تاب‌آوری بسیار حائز اهمیت است. ESS ها موجب مدیریت بهتر انرژی در ساعات پیک بار و زمان وقوع اغتشاش می‌گردند. معیار تاب‌آوری که برای کاهش اثرات وقوع حوادث شدید روی شبکه می‌باشد به عنوان یک ترم از تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. شاخص قابلیت اطمینان سیستم که برای اطمینان از عملکرد مطمئن شبکه در برابر خطاهای کوچک و خرابی‌های زودگذر می‌باشد به عنوان یک قید در مسئله مطرح شده است. یک مدل ESS دقیق و عملی، عملکرد سیستم را از نظر اقتصادی و امنیتی، بهبود می‌بخشد که نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده کارایی مدل ارایه شده می‌باشد.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32617.2579>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه
۱-۱- انگیزه پژوهش

فراهم شده است. از سویی اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه‌های توزیع کنونی، نیازهای فنی و اقتصادی سرمایه‌گذاران را برآورده نکرده است. در حالی که انتظار می‌رفت با افزایش ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده کیفیت برق بهبود یابد، به دلیل نوسانات توان ناشی از تفاوت ولتاژ و فرکانس منابع انرژی تجدیدپذیر مختلف، نتایج عکس حاصل گردیده است [۳]. با وجود اینکه استفاده از منابع تولید پراکنده

امروزه با گسترش فن‌آوری‌های تولید انرژی، افزایش توجه به مسائل زیست محیطی و علاقه برای بهبود قابلیت اطمینان^۲ شبکه‌های الکتریکی، امکان و انگیزه‌ی لازم برای تغییر شبکه‌های توزیع از حالت غیر فعال به فعال و رغبت در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح سیستم توزیع

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: afjei@yahoo.com

۱. دانشکده مهندسی برق، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

استناد به این مقاله:

² Reliability

و برای دستیابی به تقاضای بار و رعایت محدودیت‌های منابع تولیدی بررسی شده است. همچنین در این مقاله هزینه‌های آلودگی محیطی منابع ریزش‌بکه به تابع هزینه بهره‌برداری اضافه شده است. در مرجع [۹]، مسئله مدیریت ریزش‌بکه با هدف حداقل سازی هزینه بهره‌برداری با استفاده از بهینه سازی چندهدفه ارایه شده است. برتری این مقاله بررسی تبادل توان با شبکه اصلی و کامل تر شدن قیود و مدل مسئله است.

مرجع [۱۰] با در نظر گرفتن حداقل‌سازی هزینه سرمایه گذاری به عنوان تابع هدف، مدل برای توربین بادی و سلول خورشیدی معرفی نموده و ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز در ریزش‌بکه را تعیین کرده است. اما مدل آن برای ذخیره ساز با نواقصی همراه است. مرجع [۱۱] به صورت اختصاصی مسئله بهینه‌سازی ESS در ریزش‌بکه‌ها را بررسی نموده است. در این مرجع روشی برای تخصیص بهینه و تجزیه و تحلیل اقتصادی از سیستم ذخیره‌سازی انرژی بر اساس ارزش خالص فعلی منابع انرژی پراکنده ارائه شده است. برای بهینه سازی استراتژی‌های عملکرد ریزش‌بکه و ظرفیت ESS در آن، سود مالی و مدل‌های پویای ESS مورد بحث قرار گرفته است و با الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی انجام گرفته است. اما این مقاله هزینه سرمایه‌گذاری کلیه منابع ریزش‌بکه را لحاظ نموده است و در مدل آن منابع تجدیدپذیر حضور ندارد. لذا تعیین ظرفیت بهینه ESS‌ها به منظور نصب در ریزش‌بکه‌ها همچنان به توجه بالایی نیاز دارد. در مقالات [۱] و [۱۲] با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری ریزش‌بکه، ظرفیت مناسب ESS محاسبه شده است. در مدل پیشنهادی مقدار عمق دشارژ ذخیره‌ساز در نظر گرفته نشده و مقدار آن در محاسبات به صورت تجربی تعیین شده است. همچنین در مقاله [۱۳] روشی جهت تعیین اندازه بهینه سیستم ESS در یک ریزش‌بکه به منظور افزایش قابلیت اطمینان آن ارایه شده است. برای حل مسئله از برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح با هدف کمینه کردن هزینه بهره‌برداری استفاده شده است که در این مدل نیز علاوه بر مدل‌سازی نکردن عدم قطعیت‌ها، به عمق دشارژ بهینه ذخیره‌ساز توجه نشده است.

واضح است که منابع تولید پراکنده و ESS‌ها باعث مدیریت هرچه بهتر انرژی در سطوح پایین‌تر شبکه و کنترل‌پذیری

می‌تواند به صورت بالقوه‌ای نیاز برای گسترش شبکه‌های الکتریکی سنتی را کاهش دهد، اما کنترل تعداد زیادی از آنها همراه بارهای کنترل‌پذیر باعث به وجود آمدن چالشی جدید در کنترل و عملکرد یک شبکه‌ی مطمئن و اقتصادی شده است. این چالش تا به یک اندازه به وسیله ریزش‌بکه‌ها^۴ با کاهش در مسئولیت کنترلی شبکه کاهش پیدا می‌کند و باعث می‌شود تا حداکثر بازده اقتصادی به دست آید. از این رو راه حل مناسب، ساخت شبکه‌های کوچک و مستقل از شبکه اصلی یا ریزش‌بکه‌ها می‌باشد [۴، ۵].

با افزایش استفاده منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر (باد، خورشید و ...) و به دلیل عدم قطعیت^۴ در خروجی این منابع، بهره‌بردار ریزش‌بکه در مقوله خرید توان از این واحدها با مسائل عدیده‌ای روبرو است. درحالی‌که می‌توان با استفاده از ذخیره‌سازها برآورد نسبتاً دقیقی از خروجی این واحدها داشت و تا حدود زیادی برنامه‌ریزی انجام شده توسط بهره‌بردار ریزش‌بکه برای خرید توان از این واحدها با مالکیت خصوصی با ضریب خطای کمتری همراه باشد. همچنین استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر نوسانات ولتاژ و فرکانس را افزایش می‌دهد که این باعث عدم تعادل بین تولید و مصرف می‌شود. به دلیل غیر یکنواخت بودن خروجی منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر این واحدها باید به وسیله منابع انرژی با سوخت فسیلی و یا گران قیمت‌تر مانند سلول سوختی پشتیبانی شوند [۶]. عامل دیگری که ریزش‌بکه را به سمت استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی^۵ (ESS) در کنار منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر سوق می‌دهد این است که توان تولیدی این واحدها همانند واحدهای بادی در نیمه شب و واحدهای خورشیدی در ظهر، مقادیر بالاتری نسبت به بار مورد نیاز ریزش‌بکه را دارا می‌باشند.

۱-۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

مطالعات مختلفی بر روی بهینه‌سازی ریزش‌بکه‌ها انجام شده است. در مرجع [۷] به کارگیری ساختارهای ارتباطی بین منابع انرژی متنوع موجود در ریزش‌بکه با هدف حداقل سازی مصرف سوخت، تأمین تقاضای انرژی و توان ذخیره مطرح شده ولی مدل ریزش‌بکه بررسی شده در این مقاله فاقد ESS می‌باشد. در مرجع [۸]، بهینه‌سازی بهره‌برداری از ریزش‌بکه بدون در نظر گرفتن تبادل توان با شبکه اصلی

^۴ Uncertainty

^۵ Energy storage system (ESS)

^۳ Microgrid

پیش‌بینی و برنامه‌ریزی توان تولیدی واحدهای مختلف در شبکه است. ضریب خطای توان به صورت نسبتی از تفاوت توان تولیدی واقعی و توان پیش‌بینی شده تعریف می‌شود. با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (ESS)، می‌توان ضریب خطای توان را کاهش داده و به مدیریت بهتر انرژی در شرایط مختلف کمک کرد. این منابع ذخیره‌ساز به عنوان پشتیبان در سیستم‌های قدرت ایفای نقش می‌کنند که می‌توانند عملکرد شبکه را بهبود و هزینه‌های بهره‌برداری شبکه را کاهش دهند [۱۸]. در واقع ESS با ذخیره‌سازی انرژی در ساعاتی که قیمت برق ارزان است و با ارائه توان کم هزینه در مواقع وقوع خطا و حوادث شدید، موجب کاهش قطعی برق و هزینه خاموشی بارها می‌شود.

۱-۳- ضرورت انجام پژوهش

با وجود تلاش‌های صورت‌گرفته در پژوهش‌های پیشین، هنوز چالش‌هایی مانند مدیریت عدم قطعیت در توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و بهبود تاب‌آوری شبکه‌ها در برابر حوادث غیرمترقبه به طور کامل حل نشده‌اند. همچنین، بسیاری از پژوهش‌های قبلی به بررسی ESS بدون در نظر گرفتن شرایط بحرانی پرداخته‌اند. بنابراین، این پژوهش با هدف پر کردن این خلاءها و ارائه راه‌حل‌های عملی برای بهبود تاب‌آوری و قابلیت اطمینان ریزشکبه‌ها انجام شده است.

۱-۴- نوآوری و سهم اصلی مقاله

در این مقاله به دنبال تعیین اندازه بهینه ESS با هدف حداقل‌سازی همزمان هزینه‌های نصب سیستم ذخیره‌ساز و هزینه بهره‌برداری از ریزشکبه و افزایش سودآوری آن در وضعیت بهره‌برداری عادی هستیم. علاوه بر تعیین اندازه بهینه ESS در ریزشکبه، عمق دشارژ بهینه آن هم محاسبه می‌شود که در مدل بهینه‌سازی هیچ کدام از مقادیر قبلی به این موضوع توجه نشده است. برای تعیین اندازه مطلوب ESS، هزینه کل شبکه حداقل‌سازی انجام می‌شود. هزینه کل شبکه شامل هزینه سرمایه‌گذاری ESS و هزینه بهره‌برداری ریزشکبه می‌باشد. هزینه بهره‌برداری شامل هزینه تولید انرژی واحدهای محلی ریزشکبه، هزینه خرید انرژی از شبکه اصلی و هزینه بارهای خاموش شده ریزشکبه است. علاوه بر این، در این مقاله مدلی جهت بررسی نقش ESS در تاب‌آوری یک سیستم انرژی و آنالیز قابلیت

بهتر بارها در شرایط حساس و ساعات اوج مصرف می‌گردند. بنابراین نحوه برنامه‌ریزی این منابع توسط بهره‌بردار و واکنش‌پذیری مناسب در شرایط وقوع اغتشاشات کوچک و گسترده در سطح شبکه از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۴]. بهره‌برداری از سیستم قدرت، نیازمند تعادل کامل میان بخش‌ها تأمین و تقاضا است. برقرار این تعادل، ساده نیست و برای رسیدن به آن باید سطوح تأمین و تقاضا قادر به تغییرات سریع و غیرمنتظره باشند. این تغییرات می‌توانند دلایلی از قبیل خروج اجباری واحدهای تولید، خروج خطوط انتقال و توزیع و تغییرات ناگهانی بار داشته باشند. در شرایط حیاتی برق، آمادگی برای شرایط اضطراری از دو جهت دارای اهمیت است. اولاً اینکه قطع برق و طولانی شدن آن، خود می‌تواند یک بحران باشد، ثانیاً قطع برق باعث تأثیر منفی بر شرایط دیگر شده و بدین طریق باعث تشدید بحران می‌گردد. به همین دلایل میزان آمادگی شبکه‌های برق‌رسانی در برابر حوادث و انواع رخدادها از درجه اهمیت بالایی برخوردار بوده و نیاز است که اقدامات لازم برای بهبود تاب‌آوری^۶ سیستم‌های قدرت صورت گیرد [۱۵]. از طرفی طراحی و بهره‌برداری زیرساخت سیستم قدرت به‌طور معمول بر اساس معیارهای کلیدی قابلیت اطمینان نظیر امنیت و کفایت سیستم انجام می‌پذیرد. با در نظر گرفتن این معیارها در مطالعات، می‌توان مطمئن بود که تجهیزات در برابر خطاهای مختلف به‌خوبی واکنش نشان داده و کمترین قطعی برای مصرف‌کنندگان نهایی ایجاد می‌شود. اما مطالعات قابلیت اطمینان و معیارهای مربوطه نمی‌توانند تضمین کنند که یک زیرساخت انرژی می‌تواند به‌خوبی در مقابل حوادث شدید و ناگهانی واکنش نشان دهد، لذا طراحی یک سیستم قدرت که در برابر تهدیدهای مشخص قابل اطمینان بوده و در عین حال در برابر حوادث غیرمترقبه‌ای که تبعات فراوانی را به همراه دارد تاب‌آوری لازم را داشته باشد، به‌عنوان یک چالش اساسی مطرح است [۱۶]. در واقع یک شبکه قدرت و برق‌رسانی را می‌توان دارای کارایی مناسب نامید که در برابر خطاهای گذرا، در موضوع قابلیت اطمینان دارای کیفیت خوبی باشد و در برابر فاجعه‌های طبیعی و حوادث شدید نیز از تاب‌آوری قابل قبولی برخوردار باشد [۱۷]. یکی از معیارهای مهم در بهینه‌سازی عملکرد ریزشکبه‌ها، در نظر گرفتن ضریب خطای توان است. این ضریب نشان‌دهنده میزان دقت در

⁶ Resilience

۲- ضرورت بررسی قابلیت اطمینان و تاب‌آوری

یکی از معیارهای عمده در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی‌های مهندسی نگهداری و تعمیرات، قابلیت اطمینان می‌باشد. قابلیت اطمینان درجه‌ای از عملکرد سیستم قدرت است که در آن توان الکتریکی به میزان مطلوب و با استانداردهای مشخصی به دست مصرف‌کنندگان می‌رسد. با توجه به تغییر شرایط اقلیمی و افزایش وقوع حوادث شدید آب و هوایی، معیارهای قابلیت اطمینان، دیگر برای تضمین امنیت شبکه‌های برق کفایت نمی‌کنند و در کنار مطالعات امنیت شبکه، لازم است که مطالعات آسیب‌پذیری شبکه برای ارزیابی تاب‌آوری نیز به دقت انجام پذیرد.

در چند سال گذشته مفهوم تازه‌ای در صنعت برق تحت عنوان تاب‌آوری مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است که مرز بین استحکام و قابلیت اطمینان شبکه محسوب می‌شود. لزوم توجه به بحث افزایش تاب‌آوری شبکه و تداوم تامین برق با توجه به تبعات مختلف ناشی از خاموشی در سطوح اجتماعی، سیاسی و اقتصادی بیش از پیش احساس می‌شود. حوادث طبیعی و اقدام‌های خرابکارانه از جمله حوادث نادر، غیرقابل پیش‌بینی و با احتمال وقوع کم هستند که تاثیرات بسیار شدیدی را به دنبال دارند و خسارات سنگینی را بر سیستم‌های قدرت و توزیع تحمیل می‌نمایند. تاب‌آوری عبارت است از ظرفیت یک سیستم انرژی برای تحمل کردن اغتشاش و ادامه فرایند تحویل انرژی به مصرف‌کنندگان به‌طوری که یک سیستم انرژی تاب‌آور می‌تواند به سرعت از اغتشاشات بازگشته و ابزارهای جایگزینی را به منظور تأمین خدمات انرژی در شرایط وقوع رویداد و تغییر وضعیت فراهم کند [۱۹]. مطابق با تعریفی دیگر، تاب‌آوری به معنای میزان توانایی آمادگی و تطبیق با شرایط غیرقابل پیش‌بینی و ایستادگی کردن و بازیابی سریع به حالت اولیه می‌باشد. بنابراین تاب‌آوری میزان پایداری یک سیستم در برابر اغتشاشات غیرقابل پیش‌بینی می‌باشد [۲۰].

برخی اوقات شاخص‌های کلیدی از قبیل قابلیت اطمینان و امنیت شبکه به جای تاب‌آوری بکار گرفته می‌شوند. اما نکته قابل توجهی که لازم به ذکر است؛ تفاوت مفاهیم تاب‌آوری و قابلیت اطمینان می‌باشد. به این صورت که ممکن است شبکه‌ای دارای قابلیت اطمینان باشد اما همان شبکه از

اطمینان شبکه برای وضعیت بهره‌برداری بحرانی ارایه شده است. معیار تاب‌آوری، هزینه خاموشی بارها^۷ در زمان وقوع حوادث شدید می‌باشد که به عنوان یک ترم از تابع هدف آورده شده است. معیار قابلیت اطمینان، قطع بار مورد انتظار^۸ (LOLE) می‌باشد که تحت عنوان کسر مورد انتظار از بار تامین نشده در طول مدت مطالعه، تشریح می‌شود و به عنوان یک قید در مسئله در نظر گرفته شده است. در این مدل معیار تاب‌آوری برای خاموشی بزرگ ناشی از تغییرات وضعیت شدید و سریعی که قبلاً هرگز تجربه نشده‌اند در نظر گرفته شده و معیار قابلیت اطمینان برای خطاهای کوچک و خرابی‌های زودگذر ناشی از دلایل فنی بررسی شده است. همچنین، عدم قطعیت برای وقوع بلایای طبیعی، میزان تولید منابع تجدیدپذیر و بار مصرفی در نظر گرفته شده است. برای این منظور به کمک شبیه‌سازی مونت‌کارلو^۹ در ابتدا ۳۰۰۰ سناریو تصادفی تولید شده و پس از آن به کمک روش K-means، سناریوها به ۵ عدد کاهش پیدا می‌کنند تا زمان حل مسئله نیز کاهش یابد. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی^{۱۰} (MIP) برای محاسبه موثر معیار تاب‌آوری و قابلیت اطمینان در مساله بهینه‌سازی ارائه و اثرات ESS روی هزینه کل ریزش‌بکه ارزیابی شده است. بررسی‌های عددی بیانگر این است که ذخیره‌ساز در بهبود تاب‌آوری و کاهش هزینه‌های شبکه‌های قدرت می‌تواند نقش موثری ایفا کند و همچنین برای داشتن قابلیت اطمینان بالاتر، هزینه‌های توسعه شبکه افزایش می‌یابد. هدف ارایه شده، بعنوان یک ابزار تصمیم‌گیری برای تهیه اطلاعات در مورد تصمیم‌گیری‌های دراز مدت، در نظر گرفته می‌شود که کمک می‌کند تا طراحان شبکه، تصمیمات درستی بر روی مسایل اقتصادی و فنی ارائه شده، بگیرند.

۱-۵- سازمان‌دهی و بخش‌بندی مقاله

در بخش دوم مقاله، بررسی قابلیت اطمینان و تاب‌آوری و نقش ESS ها در بهبود آنها پرداخته شده است. مدل‌سازی عدم قطعیت و فرمول‌بندی مسئله در بخش‌های سوم و چهارم ارائه شده است. روش پیشنهادی و مطالعات عددی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی مسئله، مشخصات شبکه و اجزای آن در بخش پنجم و همچنین جمع‌بندی و نتیجه‌گیری هم در بخش ششم مقاله ارائه گردیده است.

⁹ Monte carlo simulation

¹⁰ Mixed Integer Nonlinear Programming

⁷ Value of loss load (VOLL)

⁸ Loss of load expectation (LOLE)

وقوع حوادث سخت و به ویژه حوادث طبیعی دامنه‌ی گسترده‌ای دارند که باعث تخریب بخش‌های مختلفی از شبکه می‌شوند. این خرابی‌ها می‌تواند ناشی از افتادن درختان بر خطوط، آب گرفتگی پست‌ها و خرابی تجهیزات دیگر شبکه باشد. در واقع ممکن است علاوه بر عدم دسترسی به شبکه بالادست ریزشکبه مجاور هم بنا به گستردگی دامنه اغتشاش و آسیب ناشی از حادثه‌ی سخت، از شبکه بالادست جدا شود و نتواند به ریزشکبه مورد مطالعه هیچ کمکی کند و ترجیح دهد که خودش هم عملکرد جزیره‌ای داشته باشد. در نتیجه ریزشکبه مورد مطالعه در زمان وقوع قطعی کاملاً به صورت جزیره‌ای عمل خواهد کرد.

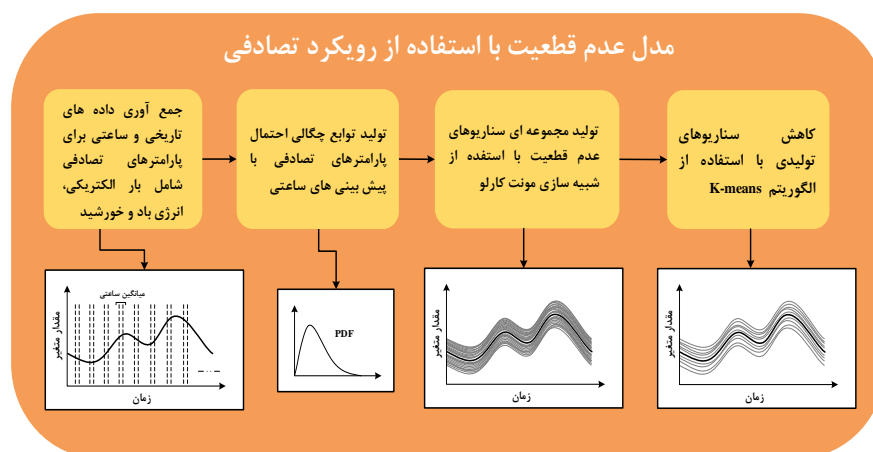
یکی از روش‌های مناسب برای مدل کردن خروج شبکه بالادست مدل $T - \tau$ است. T مدت زمان برنامه‌ریزی است که در این پژوهش ۲۴ ساعت بوده و τ مدت زمان خروج شبکه بالادست یا همان در دسترس نبودن آن است.

۳- مدل‌سازی عدم قطعیت مسئله

برای دستیابی به یک مسئله واقعی‌تر و نتایج دقیق‌تر، لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها امری ضروری است. عدم قطعیت در داده‌های یک مسئله بهینه‌سازی می‌تواند در اثر خطای پیش‌بینی، خطای اندازه‌گیری، خطای پیاده‌سازی و یا عوامل دیگری بوجود آید. عدم قطعیت‌های تاثیرگذار و مهم در مسئله برنامه‌ریزی ریزشکبه‌ها عبارتند از میزان تولید منابع تجدیدپذیر که در این زیربخش عدم قطعیت تقاضای بار الکتریکی، توان تولیدی منابع تجدید پذیر شامل توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی مدل‌سازی شده است. به ترتیب برای

تاب‌آوری لازم برخوردار نباشد. در واقع می‌توان گفت تاب‌آوری مفهومی بالادست و احاطه‌کننده قابلیت اطمینان است که علاوه بر قابلیت اطمینان، مفاهیمی از قبیل دوام، واکنش و بازیابی سریع را نیز شامل می‌شود. رخداد‌های دهه اخیر نمایان می‌کند که زیرساخت‌های برق نه تنها باید در برابر حوادث متعارف و معمول از قابلیت اطمینان مناسبی برخوردار باشند، بلکه باید در برابر حوادث با احتمال بسیار پایین و با دامنه اثرات بالا نیز تاب‌آور باشند [۲۱].

همزمان که تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی در حال پیشرفت هستند، استفاده از ESS در شبکه‌های آینده، توجه اپراتورهای سیستم را بیشتر از قبل به خود جلب می‌کند تا بطور اقتصادی در سیستم قدرت مورد استفاده قرار گیرند. ESS، مزیت‌های زیادی از قبیل کاهش نگرانی‌های نوسان، مشکلات قطعی منابع انرژی تجدیدپذیر، پیروی از بار، پایداری ولتاژ و فرکانس، کنترل بار ماکزیمم، ارتقای کیفیت توان، و تعویق ارتقای سیستم را در اختیار اپراتور شبکه قدرت قرار می‌دهد [۲۲]. معمولاً ذخیره‌ساز در ساعات غیر پیک که قیمت انرژی ارزان است، شارژ شده، و در ساعات‌های پیک که قیمت انرژی برق گران هست و یا به علت وقوع قطعی ریزشکبه از شبکه بالادست با کمبود توان مواجهه است، دشارژ می‌شود. در واقع دشارژ توان ذخیره شده، جهت تامین نیاز بار در ریزشکبه به هنگام وقوع خطا و یا برای فروش توان به شبکه اصلی و افزایش سوددهی، صورت می‌گیرد. در واقع ESS با ذخیره‌سازی انرژی در ساعاتی که قیمت برق ارزان است و تولید آن در ساعات احتمالی وقوع خطا و کاهش قطع بار اجباری، تاب‌آوری شبکه بهبود می‌دهند [۲۳].



شکل ۱- روند تولید و کاهش سناریوهای عدم قطعیت در مدل تصادفی پیشنهادی.

بودن این پیش‌بینی‌ها وجود ندارد، چرا که عوامل طبیعی دارای ماهیت کاملاً تصادفی بوده و نوسانات آنها تحت تاثیر عوامل مختلف و غیرقابل کنترل توسط بشر است. لذا از دیدگاه بهره‌برداری شبکه قدرت، منابع تجدیدپذیر خورشید به عنوان منابع دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده و خروجی آن‌ها با لحاظ کردن خطای پیش‌بینی در برنامه‌ریزی مد نظر قرار می‌گیرد. تحقیقات آماری نشان می‌دهد که برای مدل کردن شدت تابش خورشید در یک ناحیه معمولاً از تابع توزیع احتمال بتا^{۱۳} استفاده می‌شود.

$$f(\phi) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha_\phi + \beta_\phi)}{\Gamma(\alpha_\phi) + \Gamma(\beta_\phi)} \times \phi^{\alpha_\phi - 1} \cdot (1 - \phi)^{\beta_\phi - 1} & (5) \\ 0 & \end{cases}$$

$$\beta_\phi = (1 - \mu_\phi) \cdot \left(\frac{\mu_\phi \cdot (1 + \mu_\phi)}{\sigma_\phi^2} - 1 \right) \quad (6)$$

$$\alpha_\phi = \frac{\mu_\phi \cdot \beta_\phi}{1 - \mu_\phi} \quad (7)$$

در رابطه‌های فوق، تابع توزیع بتا $f(\phi)$ و پارامترهای فاکتور مقیاس α_ϕ و فاکتور شکل β_ϕ براساس میانگین μ_ϕ و انحراف معیار σ_ϕ برای متغیر تصادفی s بیان شده است. برای محاسبه‌ی توان تولیدی واحد فتوولتائیک از رابطه (۸) استفاده می‌شود. در این رابطه η^{PV} راندمان، S^{PV} مساحت صفحه خورشیدی و ϕ شدت تابش خورشید است.

$$P^{PV}(\phi) = \eta^{PV} \times S^{PV} \times \phi \quad (8)$$

۳-۳-۳- مدل‌سازی عدم قطعیت بار الکتریکی

عدم قطعیت در پیش‌بینی بار الکتریکی با استفاده از تابع توزیع احتمال^{۱۴} (PDF) نرمال صورت گرفته است. در این تحقیق فرض شده که رفتار مصرف‌کنندگان برای هر دو وضعیت بهره‌برداری عادی و بحرانی یکسان باشند. جزئیات مدل‌سازی و پارامترهای این تابع توزیع در [۲۴] آدرس داده شده است.

۳-۴- تولید سناریو

از دیدگاه محاسباتی، یک راه مناسب جهت توصیف فرآیندهای تصادفی از طریق سناریوهاست. یک سناریو، یک تحقق یکتا از یک فرآیند تصادفی می‌باشد. برای آنکه یک فرآیند تصادفی به اندازه کافی بررسی شود، باید به اندازه کافی سناریو تولید شده تا محتمل‌ترین تحقق‌های این

تولید و کاهش سناریوهای عدم قطعیت مسئله از شبیه‌سازی مونت کارلو و الگوریتم K-means استفاده شده است که روند آن در شکل (۱) ارائه شده است.

۳-۱- عدم قطعیت تولید توان توربین بادی

با توجه به ماهیت تصادفی سرعت وزش باد، توربین‌های بادی نمی‌توانند به صورت پیوسته و پایدار توان تولیدی داشته باشند. برای استفاده از انرژی باد به عنوان یک منبع تولید توان قابل اعتماد باید برای مدل‌سازی توربین‌های بادی روش خاصی بیابیم. یکی از موثرترین راه برای لحاظ کردن ماهیت تصادفی این منابع، روش‌های احتمالاتی است. در مدل‌سازی مسئله می‌توان سرعت باد را با استفاده از مدل‌ها آماری و یا احتمالاتی محاسبه کرد. مطالعات آماری و تحقیقات انجام شده ثابت کرده‌اند که تغییرات سرعت باد شبیه به توزیع وایبول^{۱۱} می‌باشد. بنابراین می‌توان برای مدل‌سازی تغییرات سرعت باد از تابع چگالی وایبول جهت استفاده کرد. می‌توان به شرح زیر تابع وایبول را تعریف کرد:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

که در آن k پارامتر شکل و c پارامتر مقیاس تابع توزیع وایبول و v سرعت باد در ناحیه می‌باشد. توان تولید شده و تحویلی به شبکه زمانی که تغییرات سرعت باد مشخص باشد را می‌توان با معادله (۲) محاسبه کرد.

$$P^w(v) = \begin{cases} 0 & \text{if } v \leq v_{in}^c \text{ or } v \geq v_{out}^c \\ \frac{v - v_{in}^c}{v_{rated}^c - v_{in}^c} P_r^w & \text{if } v_{in}^c \leq v \leq v_{rated}^c \\ P_r^w & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

که P_r^w توان تولیدی مجاز^{۱۲} برای توربین بادی نصب شده می‌باشد. v_{in}^c و v_{out}^c به ترتیب نقاط وصل و قطع سرعت باد در توربین بادی می‌باشند. نمودار سرعت-توان یک توربین بادی در شکل (۲) نشان داده شده است. مقادیر v_{in}^c ، v_{rated}^c و v_{out}^c به ترتیب ۳، ۱۲ و ۲۵ متر بر ثانیه می‌باشند.

۳-۲- عدم قطعیت تولید توان سیستم فتوولتائیک

از آنجائیکه منبع انرژی اولیه این واحدها خورشید است، لذا خروجی الکتریکی آن‌ها نیز تا حد زیادی وابسته به این منبع است. شدت تابش خورشید برای بازه‌های زمانی ساعت، روز یا ماه قابل پیش‌بینی است ولی هیچ اطمینانی بر بدون خطا

¹³ Beta distribution

¹⁴ Probability distribution function (PDF)

¹¹ Weibull distribution

¹² Rated power

خوشه‌بندی اتوماتیک از شاخص DB استفاده شده است [۲۵]. با به حداقل رساندن مسئله بهینه‌سازی، تعداد مشخصی از مرکزها انتخاب شده و به نزدیکترین سناریو در مجموعه سناریوی اصلی اختصاص می‌یابند و مرکزها به روز می‌شوند. سپس با افزودن احتمالات سناریوهای انتخاب نشده به مراکز به روز شده در هر خوشه، توزیع مجدد احتمالات را انجام می‌شود. بنابراین، مجموعه سناریوی کاهش یافته توسط سناریوهای منتخب با احتمالات مربوطه ارائه می‌شود.

به عبارتی دیگر، الگوریتم K-means برای خوشه‌بندی به منظور کاهش گسترش درون خوشه‌ای استفاده می‌شود. الگوریتم K-means مرکز خوشه‌ها را محاسبه می‌کند و تا زمانی که مرکز مطلوب را پیدا نکند، این روند را تکرار می‌کند. این الگوریتم برای طبقه‌بندی سناریوهای تولید مشابه در گروه‌های مختلف استفاده می‌شود. مرکز خوشه بدست می‌آید، در حالی که فاصله تمام سناریوهای واقع در خوشه از مرکز به حداقل می‌رسد. به عبارت دیگر، الگوریتم K-means با هدف به حداقل رساندن فاصله اقلیدسی از مرکز خوشه تا هر سناریوی اولیه استفاده می‌شود:

$$\min_z \sqrt{\sum_{c=1}^{N_c} \sum_{s=1}^{N_s} (z_c - x_s)^2 \delta_{c,s}} \quad (9)$$

در این معادله N_s بیانگر تعداد سناریوهای اولیه می‌باشد؛ N_c تعداد مراکز خوشه‌ها است. s سناریوهای تولید شده شامل توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و توان مصرفی را نشان می‌دهد. در این رابطه z مرکز خوشه است. همچنین متغیر باینری وابستگی سناریو به خوشه $\delta_{c,s} \in \{0,1\}$ را نشان می‌دهد [۲۶].

۴- مدل‌سازی و فرمول‌بندی مسئله

هدف کلی از برنامه‌ریزی ریزشک‌ها اتخاذ بهترین تصمیم در استفاده از مولدها برای تولید توان الکتریکی در یک ریزشک، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی بهینه ذخیره‌سازها، مدیریت صحیح بار و همچنین خرید و فروش مناسب برق از شبکه است. هدف از این مقاله، ارائه یک روش برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه جهت بهبود عملکرد فنی و اقتصادی ریزشک در هر دو وضعیت بهره‌برداری عادی و بحرانی است.

در وضعیت بهره‌برداری عادی، علاوه بر تعیین اندازه بهینه ESS در ریزشک، عمق شارژ/دشارژ بهینه آن هم محاسبه

فرآیند از طریق سناریوها تا حد خوبی پوشش داده شود. در برنامه‌ریزی تصادفی، فرآیندهای تصادفی را می‌توان به وسیله متغیرهای تصادفی گسسته یا پیوسته نشان داد. از آنجایی که توابع توزیع احتمال توابعی پیوسته هستند بی‌نهایت سناریو قابل ایجاد است که برای جلوگیری از پیچیدگی، مجموعه‌ای از سناریوهای گسسته از توابع توزیع احتمال به کار می‌رود که تقریب مناسبی برای مدل کردن عدم قطعیت است. در این شبیه‌سازی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و توابع توزیع احتمال تعداد زیادی سناریو عدم قطعیت برای توان تولیدی باد و خورشید تولید می‌شود. بنابراین برای بدست آوردن عدم قطعیت‌های مسئله با استفاده از توابع توزیع احتمال از شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید ۳۰۰۰ سناریو استفاده شده است. هر سناریو شامل $24 \times 3 = 72$ اجزا است که نشان دهنده توان تولیدی توربین بادی و سیستم فتوولتائیک و بار الکتریکی مصرفی ریزشک در طول روز می‌باشند.

۳-۵- روش کاهش سناریو

در اکثر مسائل برنامه‌ریزی اتفاقی، برای دقیق‌تر شدن فرآیند حل، معمولاً تعداد سناریوها بالا است و در این حالت محاسبات با افزایش تعداد سناریوها پیچیده‌تر می‌شود. لذا به علت پیچیدگی محاسبات و محدودیت‌های زمانی، مسئله با تعداد سناریوهای کمتر تقریب زده می‌شود. یک روش قابل قبول برای کاهش سناریو باید به گونه‌ای باشد که پاسخ بهینه حاصل از سناریوهای کاهش یافته نزدیک به پاسخ حاصل از سناریوهای اولیه باشد. الگوریتم‌های کاهش سناریو، زیرمجموعه‌ای از سناریوها را مشخص کرده و احتمالات جدید را به سناریوهای تعیین شده عمل می‌کنند. در این حالت می‌توان گفت که تمام سناریوهای جذف شده احتمال صفر دارند. در این مدل از خوشه‌بندی برای کاهش سناریو استفاده می‌شود. خوشه‌بندی یا آنالیز خوشه در آمار و یادگیری ماشینی، یکی از شاخه‌های یادگیری بدون نظارت می‌باشد. این فرآیند شامل تقسیم نمونه‌ها به دسته‌هایی است که اعضای هر دسته شباهت زیادی به یکدیگر دارند که به این دسته‌ها خوشه گفته می‌شود. بنابراین خوشه مجموعه‌ای از اشیاء می‌باشد که در آن اشیاء با یکدیگر مشابه بوده و با اشیاء موجود در شاخه‌های دیگر غیرمشابه می‌باشند.

در این مقاله برای کاهش سناریوها از الگوریتم K-means برای خوشه‌بندی استفاده شده است. برای الگوریتم

$$\begin{aligned}
 OC = & \sum_{g=1}^{N_g} \pi_s^T \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{h=1}^{N_h} \sum_{i=1}^{N_i} F_g(P_{s,t,h}^g) \\
 & + \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s^T \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{h=1}^{N_h} \omega_{t,h} \cdot P_{s,t,h}^M \\
 & + \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s^T \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{h=1}^{N_h} \sum_{i=1}^{N_i} \rho_{t,h} \cdot Plsh_{s,t,h}^i
 \end{aligned} \quad (12)$$

هزینه‌های اولیه برای هر سال لحاظ شده‌اند و در طول عمر تکنولوژی‌های ESS مربوطه، توزیع شده‌اند. هزینه سرمایه‌گذاری برای نصب سیستم ESS وابسته به حداکثر توان قابل انتقال و حداکثر انرژی قابل ذخیره در آن می‌باشد. ICP^{17} هزینه سرمایه‌گذاری تعیین توان نامی ESS، ICE^{18}

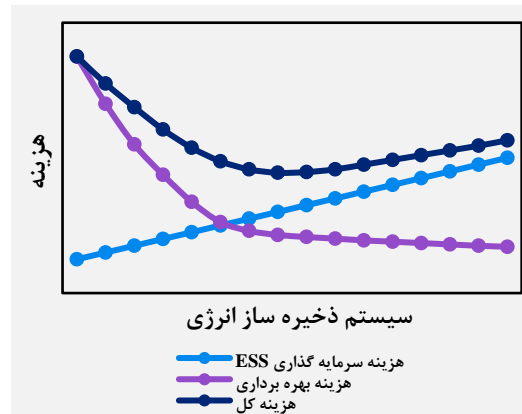
هزینه سرمایه‌گذاری تعیین انرژی نامی ESS و P^{soc} توان نامی ESS می‌باشند بنابراین هزینه سرمایه‌گذاری با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. هزینه‌های سوخت تولید توان الکتریکی به واسطه واحدهای محلی ریزشبهه، هزینه خرید و فروش برق و تبادل انرژی با شبکه اصلی و هزینه خاموشی بارهای ریزشبهه، هزینه موردنظر بهره‌برداری ریزشبهه را تشکیل می‌دهند که در معادله (۱۱) نشان داده شده است. در این رابطه هزینه بهره‌برداری از واحدهای با سوخت فسیلی توسط $F_g(P_{s,t,h}^g)$ محاسبه می‌شود و $P_{s,t,h}^g$ توان تولیدی واحد موجود g در روز t ساعت h در سناریو s ، $Plsh_{s,t,h}^i$ توان بار بی‌برق شده با i ریزشبهه در روز t و ساعت h در سناریو s ، $P_{s,t,h}^M$ توان وارد شده یا صادر شده (همان توان دریافتی و انتقالی از ریزشبهه به شبکه) از (یا به) شبکه اصلی در روز t ساعت h در سناریو s ، N_g تعداد واحدهای موجود، N_t تعداد روزها، N_h تعداد ساعت‌ها، N_s تعداد سناریوها، N_i تعداد باس‌های موجود، $\omega_{t,h}$ قیمت برق، $\rho_{t,h}$ هزینه خاموشی مصرف‌کننده، s شاخص سناریو، π_s^T احتمال سناریو s ، t شاخص روز، h شاخص ساعت، g شاخص واحد مرسوم و i شاخص باس بار مصرفی می‌باشد.

۴-۲- محدودیت‌های سیستم ذخیره‌ساز انرژی

بطور کلی وضعیت ESS در سه حالت شارژ، دشارژ و بدون استفاده تعریف می‌شود. معادلات شارژ و دشارژ EES و محدودیت‌های آن در (۱۳) تا (۲۰) مدل‌سازی شده است. از دشارژ جزئی داخلی ESS در زمان عدم شارژ و دشارژ صرف‌نظر شده است [۲۸].

می‌شود. برای تعیین اندازه مطلوب ESS، هزینه کل شبکه حداقل‌سازی انجام می‌شود. هزینه کل شبکه شامل هزینه سرمایه‌گذاری ESS و هزینه بهره‌برداری ریزشبهه می‌باشد. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است هزینه‌های شبکه نسبت به اندازه ESS متغیر می‌باشند. به این صورت که با افزایش اندازه ESS، هزینه سرمایه‌گذاری ریزشبهه به صورت خطی افزایش و هزینه بهره‌برداری ریزشبهه کاهش می‌یابد. در واقع اندازه مطلوب ESS، منجر به کاهش هزینه کل ریزشبهه می‌شود. از طرفی از اندازه بهینه محاسبه شده ذخیره‌ساز، برای بهبود تاب‌آوری در وضعیت بهره‌برداری بحرانی استفاده می‌شود.

در این بخش، مدل کلی بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی ریزشبهه و تعیین اندازه مطلوب ESS در آن، ماهیت مدل و جزئیات مربوط به هر مولفه مدل معرفی شده است. همچنین توابع هدف و محدودیت‌های مربوط به ESS ارائه شده است. در ادامه در مورد محدودیت‌های ریزشبهه، واحدهای تولیدی، محدودیت‌های عملیاتی و قابلیت اطمینان بحث شده است.



شکل ۲- سایزینگ بهینه سیستم ذخیره‌ساز انرژی

۴-۱- تابع هدف

تابع هدف شامل هزینه کل سرمایه‌گذاری ESS (IC)^{۱۵} و هزینه عملکرد مورد انتظار ریزشبهه^{۱۶} (OC) به صورت روزانه برای یک سال در معادله (۱۰) نشان داده شده است [۲۷].

$$\forall i \in N_i, s \in N_s, t \in N_t, h \in N_h \quad (10)$$

$$OF = \text{Min} \{ IC + OC \}$$

$$IC = ICP \cdot P^{soc} + ICE \cdot SOC_{\max} \quad (11)$$

¹⁷ Installation cost of power rating for ESS (ICP)

¹⁸ Installation cost of energy rating for ESS (ICE)

¹⁵ Microgrid total investment cost (IC)

¹⁶ Microgrid total operating cost (OC)

$$\forall g \in N_g, s \in N_s, t \in N_t, h \in N_h, \{UX_{s,t,h}^g, UY_{s,t,h}^M\} \in \{0,1\}$$

$$\sum_{g \in N_g} P_{s,t,h}^g + P_{s,t,h}^{wind} + P_{s,t,h}^{solar} + P_{s,t,h}^d + P_{s,t,h}^M + Plsh_{s,t,h}^i = PL_{s,t,h}^L + P_{s,t,h}^c \quad (21)$$

$$P_{\min}^g \cdot UX_{s,t,h}^g \leq P_{s,t,h}^g \leq P_{\max}^g \cdot UX_{s,t,h}^g \quad (22)$$

$$P_{s,t,h}^g - P_{s,t,h-1}^g \leq RU_g \quad (23)$$

$$P_{s,t,h-1}^g - P_{s,t,h}^g \leq RD_g \quad (24)$$

$$|P_{s,t,h}^M| \leq P_{\max}^M \cdot UY_{s,t,h}^M \quad (25)$$

$$0 \leq P_{s,t,h}^{wind} \leq P_r^{wind} \quad (26)$$

$$0 \leq P_{s,t,h}^{solar} \leq P_r^{solar} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{s,t,h}^{lsh} \leq P_{s,t,h}^L \quad (28)$$

محدودیت‌های مقدار بیشینه و کمینه توان تولیدی واحد g برای هر سناریو s در روز t و ساعت h ، توسط معادله (۲۲) بیان می‌شود. که در آن P_{\min}^g کمینه توان تولیدی واحد g ، P_{\max}^g بیشینه توان تولیدی واحد g و متغیر باینری $UX_{s,t,h}^g$ وضعیت در مدار قرار داشتن واحد g در روز t ساعت h در سناریو s می‌باشد. معادلات (۲۳) و (۲۴) افزایش یا کاهش توان تولیدی بین دو ساعت متوالی را کنترل می‌کند. RU_g حد صعودی توان (پله افزایشی) واحد g و RD_g حد نزولی توان (پله کاهش) واحد g را نشان می‌دهد. ظرفیت توان مبادله شده بین ریزشکها و شبکه اصلی، با معادله (۲۵) محدود می‌شود. P_{\max}^M مثبت است وقتی که از شبکه اصلی توان دریافت کند و هنگام فروش توان منفی است و وقتی که ریزشکها از شبکه جدا است، صفر می‌باشد. P_{\max}^M حد وارد (یا صادر) کردن توان و متغیر باینری $UY_{s,t,h}^M$ وضعیت اتصال خط متصل به شبکه اصلی در روز t ساعت h در سناریو s می‌باشد که اگر شبکه متصل باشد مقدار آن یک و در غیر اینصورت مقدار آن صفر خواهد بود. با توجه به ماهیت تصادفی انرژی باد و خورشیدی، ظرفیت آنها نمی‌تواند از ظرفیت موجود در هر سناریو بیشتر باشد که با رابطه (۲۶) و (۲۷) محدود شده است. که P_r^{solar} و P_r^{wind} به ترتیب توان تولیدی مجاز برای توربین بادی و سیستم‌های فتوولتائیک نصب شده می‌باشند. قطع بار، به واسطه بار لحظه‌ای ریزشکها در هر سناریو و با رابطه (۲۸) محدود می‌شود.

$$\forall i \in N_i, s \in N_s, t \in N_t, h \in N_h$$

$$SOC_{s,t,h} = SOC_{s,t,h-1} + (P_{s,t,h}^c \eta_c - P_{s,t,h}^d / \eta_d) \cdot \Delta h \quad (13)$$

$$0 \leq P_{s,t,h}^c \leq P^{soc} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{s,t,h}^d \leq P^{soc} \quad (15)$$

$$P^{soc} = k \times SOC_{\max} \quad (16)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_{s,t,h} \leq SOC_{\max} \quad (17)$$

$$SOC_{s,t,h(\text{start})} \leq SOC^0 \quad (18)$$

$$SOC_{s,t,h(\text{end})} = SOC^{end} \quad (19)$$

$$ICP \cdot P^{soc} + ICE \cdot SOC_{\max} \leq CIF \quad (20)$$

میزان انرژی ESS، به واسطه معادله (۱۳) تعیین می‌شود. انرژی ذخیره شده در هر ساعت با انرژی ذخیره شده در ساعت قبلی بعلاوه وضعیت شارژ یا دشارژ در همان ساعت تعیین می‌شود. بخاطر فاصله زمانی ۱ ساعتی، $\Delta h = 1$ را لحاظ می‌کنیم. میزان انرژی ذخیره شده در روز t ساعت h در سناریو s با $SOC_{s,t,h}$ و توان شارژ و دشارژ نیز به ترتیب با $P_{s,t,h}^c$ و $P_{s,t,h}^d$ نشان داده می‌شود. η_c و η_d بیانگر بازده شارژ و دشارژ سیستم ذخیره ساز انرژی می‌باشند. توان‌های شارژ و دشارژ ESS توسط (۱۴) و (۱۵) محدود می‌شوند. توان نامی ذخیره ساز در معادله (۱۶) تعیین می‌شود که در آن k عمق تخلیه ذخیره‌ساز می‌باشد. معادله (۱۷)، میزان انرژی ESS را محدود می‌کند. توسط معادلات (۱۸) و (۱۹) میزان انرژی ESS در آغاز و پایان هر روز، محدود می‌شود. معادله (۲۰) بودجه سرمایه‌گذاری اولیه برای نصب ESS را محدود می‌کند که پیرو آن اندازه ESS نیز محدود می‌شود و $CIF^{1\wedge}$ بودجه سرمایه‌گذاری اولیه برای ESS می‌باشد.

۳-۴- محدودیت‌های شبکه و مولدها

توان حقیقی تولیدی توسط منابع توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی در باس i به ترتیب به وسیله $P_{s,t,h}^{solar}$ و $P_{s,t,h}^{wind}$ نشان داده شده است. $P_{s,t,h}^{lsh}$ بیانگر توان بار خاموش شده در باس i می‌باشند. در این روابط $P_{s,t,h}^L$ تقاضای بار در هر سناریو را نشان می‌دهد مجموع توان تولیدی واحدهای محلی تولید برق، توان مبادله شده بین ریزشکها و شبکه اصلی و توان شارژ و یا دشارژ باتری ذخیره باید برابر با تقاضای بار لحظه‌ای ریزشکها باشند. تعادل توان تولیدی و تقاضا با استفاده از رابطه (۲۱) بیان می‌گردد [۱].

ریزشبکه مورد نظر دارای ۳ واحد حرارتی و یک توربین بادی و یک پنل خورشیدی می‌باشد که مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است. توان خط واصل بین ریزشبکه و شبکه، ۱۰ مگاوات است که انتقال توان بین شبکه و ریزشبکه را کنترل می‌کند [۱].

بار ریزشبکه برای یک روز نمونه از سال در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین قیمت برق در شبکه بالادستی که ریزشبکه به آن متصل است در جدول ۲ آورده شده است. ESS برای ریزشبکه، دارای هزینه‌های سرمایه‌گذاری توان و انرژی سالانه ۴۰۰۰۰ دلار بر مگاوات بر سال و ۱۱۰۰۰ دلار بر مگاوات ساعت بر سال می‌باشند. بازده شارژ و بازده دشارژ به ترتیب ۹۵٪ و ۹۰٪ در نظر گرفته شده‌اند. فرض بر این است که بار ریزشبکه در سال‌های آتی ثابت بوده، لذا کل برنامه‌ریزی‌ها فقط برای یک سال لحاظ شده‌اند. روش ارایه شده، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی (MIP) می‌باشد که با استفاده از نرم افزار بهینه‌سازی GAMS و سالور CPLEX اجرا شده است. برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی حالت‌های مختلفی بررسی و آنالیز خواهد شد تا اثرات ESS با اندازه بهینه در یک ریزشبکه نمونه بررسی شود. در ادامه، مسئله تعیین ظرفیت بهینه ESS با

۴-۴- معیار قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان، تعریفی از LOLE می‌باشد. میزان قطع بار در هر زمان و سناریو توسط معادله (۲۹) نشان داده شده است. در این رابطه $w_{s,t,h}$ برابر ۱ خواهد بود هرگاه تقاضای بار قطع شود. احتمال سناریوهای قطع تقاضای بار در LOLE بواسطه این شاخص قطع بار در معادله (۳۰) نظر گرفته می‌شود. LOLE سال، بایستی کمتر از مقدار مورد انتظار محاسبه شده از قبل باشد که در معادله (۳۱) در نظر گرفته شده است [۱].

$$0 \leq P_{s,t,h}^{lsh} \leq M \cdot w_{s,t,h} \quad (29)$$

$$LOLE = \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{h=1}^{N_h} w_{s,t,h} \quad (30)$$

$$LOLE \leq LOLE^{T\text{arget}} \quad (31)$$

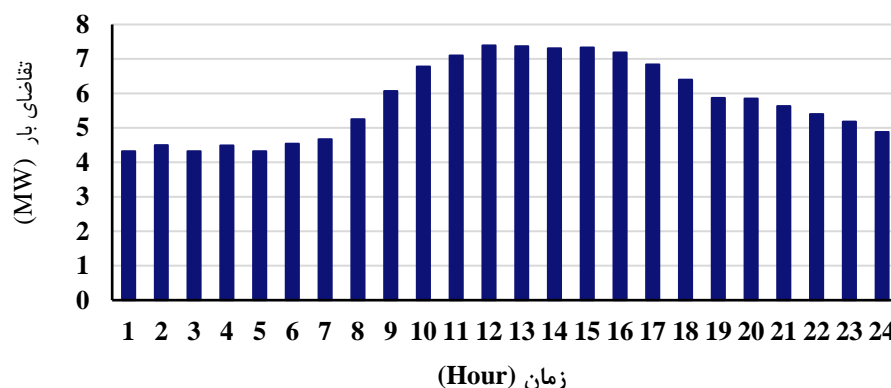
۵- شبیه‌سازی و نتایج عددی

شبکه تست مورد نظر یک ریزشبکه متشکل از مجموعه‌ای از بارها، منابع تولید پراکنده و ESS است که می‌تواند در دو وضعیت متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

۵-۱- اطلاعات ورودی و فرضیات مسئله

جدول ۱- مشخصات واحدهای تولیدکننده [۱].

واحدها	نوع واحد	ضریب هزینه (\$/MWh)	حداقل ظرفیت (MW)	حداکثر ظرفیت (MW)	نرخ افزایشی (MW/h)	نرخ کاهش (MW/h)
۱	گازی	۲۷/۷	۱	۵	۲/۵	۲/۵
۲	گازی	۳۹/۱	۱	۳	۲/۵	۲/۵
۳	گازی	۶۱/۶	۰/۸	۳	۳	۳
۴	خورشیدی	۰	۰	۱	-	-
۵	بادی	۰	۰	۱	-	-



شکل ۳- تقاضای بار یک روز نمونه از سال [۲].

مطالعه اول به عنوان حالت مبنا فرض می‌شود که ریزشبه بدون سیستم ذخیره‌ساز مورد برنامه‌ریزی قرار می‌گیرد. هزینه کل ریزشبه، ۱۰۴۴۷۹۸ دلار می‌باشد. هزینه کل تولید، ۲۱۲۸۴۲۶ دلار و هزینه کل توان خرید از شبکه بالادستی، ۹۷۴۶۹ دلار می‌باشد. با این حال، سود اقتصادی ۱۱۸۱۰۹۷ دلار از فروش توان به شبکه اصلی در حالت اضافه تولید، برای ریزشبه، حاصل شده است. همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است به هنگام ارزانی قیمت برق در ساعات‌های اولیه، خرید توان از شبکه اصلی به ریزشبه آغاز می‌شود؛ و به هنگام گرانی برق بازار، تولید واحدهای حرارتی درون ریزشبه افزایش می‌یابد تا بار را تامین کنند و توان تولید شده مازاد نیز به شبکه اصلی فروخته شود.

۵-۳- مطالعه دوم

در این مطالعه، یک ذخیره‌ساز انرژی ۱۰ MWh با عمق دشارژ ۰/۴۶ به ریزشبه افزوده شده است که توان نامی آن ۴/۶ MW می‌باشد. هزینه عملکرد کل ریزشبه، ۱۰۲۳۸۴۱ دلار می‌باشد، که دربرگیرنده هزینه کل تولید ۲۱۳۳۴۷۱ دلار، هزینه کل خرید توان ۷۰۹ دلار، هزینه سرمایه گذاری ESS برابر با ۲۹۴۰۰۰ دلار و مبلغ ۱۴۰۴۳۳۹ دلار حاصل شده از فروش توان می‌باشد. کاهش هزینه عملکرد کل ریزشبه نسبت به مطالعه اول بیشتر بخاطر درآمد حاصل از فروش توان تولیدی ESS به شبکه بالادستی می‌باشد. در شکل (۵) برنامه‌ریزی واحدهای قابل دیسپچ و تبادل توان میان میکروگرید و شبکه اصلی در مطالعه دوم نشان داده شده است. ذخیره‌ساز در این

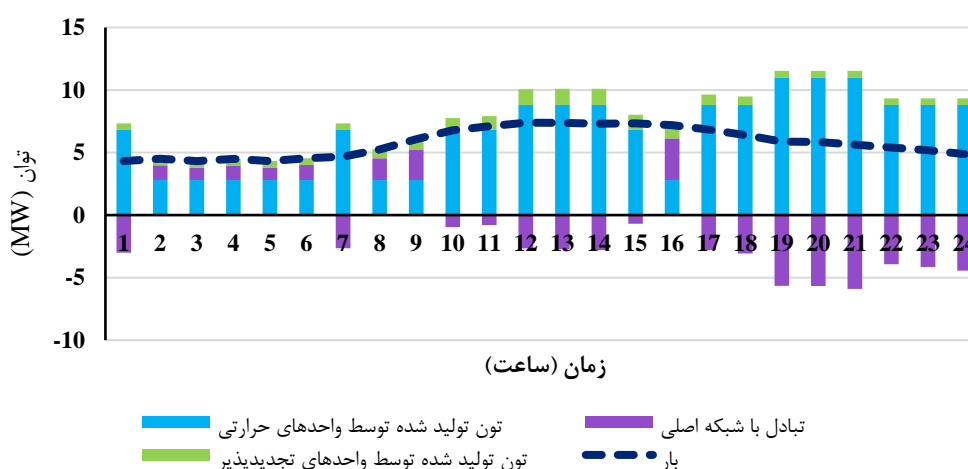
استفاده از برنامه‌ریزی ریزشبه و بررسی تاثیر آن روی تاب‌آوری و قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن پنج مطالعه برای بهره‌برداری‌های عادی و بحرانی تحلیل می‌گردد.

- مطالعه اول: مورد مبنا بدون ESS.
- مطالعه دوم: اضافه کردن یک ESS با توان نامی 1 MW و عمق دشارژ ۰/۴۶ به ریزشبه.
- مطالعه سوم: تعیین اندازه بهینه ESS در ریزشبه.
- مطالعه چهارم: بهره‌برداری از شبکه به هنگام وقوع حادثه بدون ESS.
- مطالعه پنجم: بهره‌برداری از شبکه به هنگام وقوع حادثه شدید به همراه ESS.

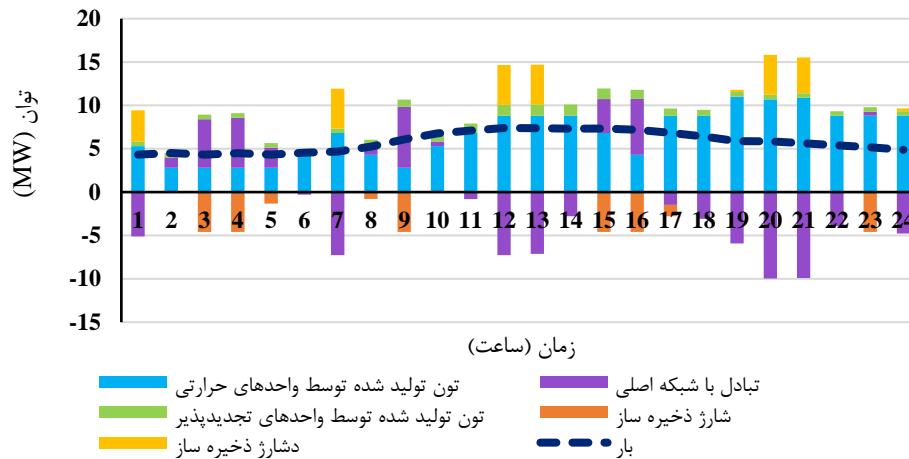
جدول ۲- هزینه هر ساعت انرژی الکتریکی [۱۸].

زمان (Hour)	هزینه (\$/MWh)	زمان (Hour)	هزینه (\$/MWh)
۱	۳۵/۲۳	۱۳	۵۵/۳۹
۲	۱۵/۹۷	۱۴	۴۵/۵۷
۳	۱۵/۵۱	۱۵	۳۵/۴۴
۴	۱۵/۳۶	۱۶	۲۵/۹۷
۵	۱۵/۷۱	۱۷	۴۰/۴۵
۶	۲۵/۳۰	۱۸	۵۵/۲۸
۷	۳۵/۱۸	۱۹	۷۵/۱۵
۸	۲۵/۸۳	۲۰	۱۱۵/۵۳
۹	۱۵/۰۵	۲۱	۸۵/۳۸
۱۰	۳۵/۳۹	۲۲	۵۵/۹۵
۱۱	۳۵/۸۶	۲۳	۴۵/۴۲
۱۲	۵۵/۶۵	۲۴	۵۵/۶۸

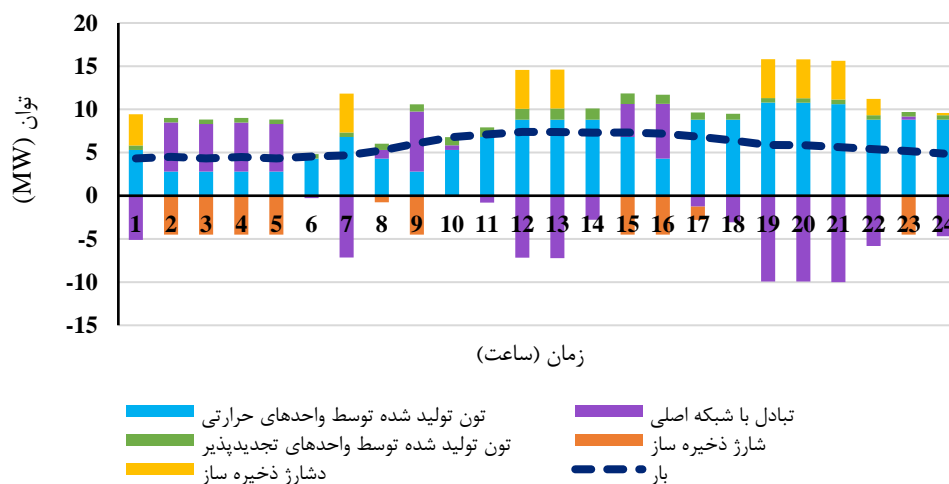
۵-۲- مطالعه اول



شکل ۴- برنامه‌ریزی واحدهای قابل دیسپچ و تبادل توان میان ریزشبه و شبکه اصلی در مطالعه اول.



شکل ۵- برنامه‌ریزی واحدهای قابل دیسپچ و تبادل توان میان ریزشیکه و شبکه اصلی در مطالعه دوم.



شکل ۶- برنامه‌ریزی واحدهای قابل دیسپچ و تبادل توان میان ریزشیکه و شبکه اصلی در مطالعه سوم.

کردن مقادیر فوق، هزینه کل عملکرد ریزشیکه، ۹۸۲.۵۷۲ دلار خواهد شد، که این کاهش هزینه به خاطر افزایش فروش توان ریزشیکه به شبکه بالادستی می‌باشد. برنامه-ریزی واحدهای قابل دیسپچ و تبادل توان میان ریزشیکه و شبکه اصلی در مطالعه سوم در شکل (۶) نشان داده شده است. در این مطالعه ذخیره ساز تقریباً در کمتر از ۴ ساعت قابل شارژ است تا به بیشینه سطح شارژ خود برسد. همانند مطالعه دوم، ESS معمولاً در ساعت‌های غیرپیک که قیمت انرژی ارزان است، شارژ شده، و در ساعت‌های پیک که قیمت انرژی برق نیز گران هست، دشارژ می‌شود.

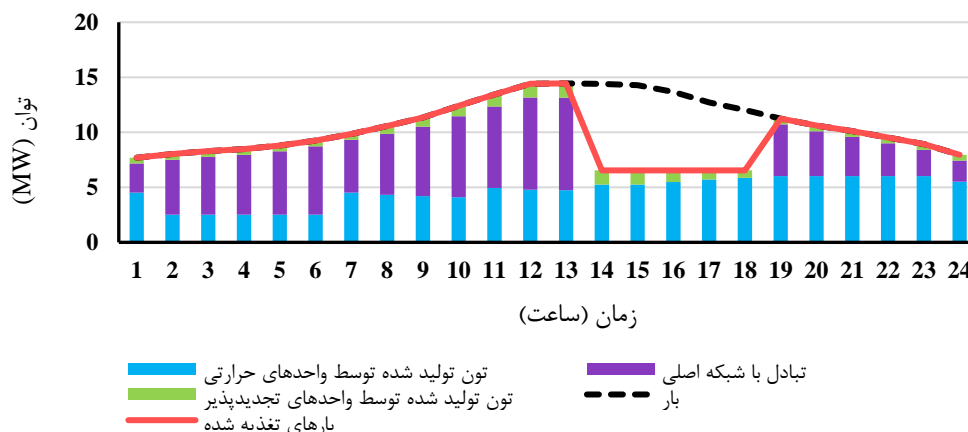
۵-۵- مطالعه چهارم

هدف از مطالعات چهارم و پنجم مشاهده تاثیر وجود ESS بر عملکرد سیستم به عنوان راهکاری برای افزایش تاب‌آوری شبکه می‌باشد. بنابراین برای مشاهده تاثیر حادثه روی شبکه، تقاضای بار در ضریبی ضرب و افزایش یافته است.

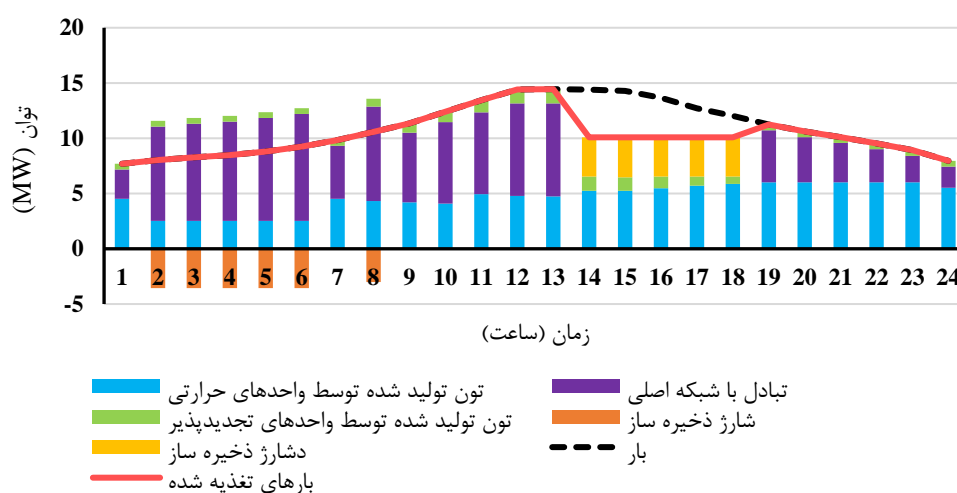
ریزشیکه در ساعت پنجم به بیشینه مقدار خود می‌رسد و کامل شارژ می‌شود. ذخیره ساز معمولاً در ساعات غیر پیک که قیمت انرژی ارزان است، شارژ شده، و در ساعت‌های پیک که قیمت انرژی برق گران هست، دشارژ می‌شود. دشارژ توان ذخیره شده در ساعات پیک، جهت تامین نیاز بار در ریزشیکه به هنگام اضافه بار، و یا برای فروش توان به شبکه اصلی و افزایش سوددهی، صورت می‌گیرد.

۵-۴- مطالعه سوم

با بکارگیری روش ارایه شده، اندازه بهینه ESS، MWh، ۱۷/۱۰۵ با عمق دشارژ ۰/۲۶۳ و توان نامی ۴/۴۹ MW بدست آمده است. با اضافه کردن ESS، هزینه کل تولید و هزینه کل توان خریداری شده، ۲.۱۲۳.۹۹۸ و ۸۱۵ دلار می‌باشند. همچنین، هزینه سرمایه‌گذاری ESS نیز ۳۶۸.۲۰۶ دلار است. درآمد ریزشیکه در ازای فروش توان به شبکه بالادستی، ۱.۵۱۰.۴۴۷ دلار می‌باشد. با لحاظ



شکل ۷- برنامه‌ریزی واحدهای قابل دیسپچ و تبادل توان میان ریزشبکه و شبکه اصلی در مطالعه چهارم.



شکل ۸- برنامه‌ریزی واحدهای قابل دیسپچ و تبادل توان میان ریزشبکه و شبکه اصلی در مطالعه پنجم.

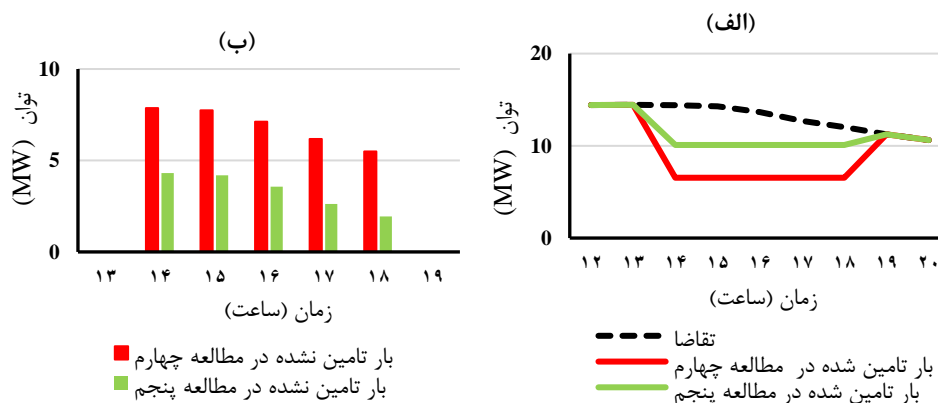
جلوگیری می‌کند. برنامه‌ریزی واحدهای قابل دیسپچ و تبادل توان میان ریزشبکه و شبکه اصلی در مطالعه پنجم در شکل (۸) آورده شده است. مطابق با این شکل، وضعیت بارهای تغذیه شده در ساعات ۱۳ تا ۱۹ بهبود یافته است. نقش ESS به عنوان پشتیبان به خوبی نمایان است. همچنین هزینه قطعی بارهای خاموش شده به ۶.۶۵۳ دلار کاهش پیدا می‌کند که این کاهش هزینه نسبت به مطالعه چهارم به دلیل دشارژ توان ذخیره شده در ESS در وضعیت جزیره‌ای ریزشبکه می‌باشد. در واقع دشارژ توان ذخیره شده، جهت تامین نیاز بار در ریزشبکه به هنگام وقوع خطا و یا برای جلوگیری از خرید توان از شبکه اصلی و افزایش سوددهی، صورت می‌گیرد.

بارهای تامین شده و نشده به عنوان یک شاخص مناسب برای تاب‌آوری عمل می‌کنند که در شکل (۹) برای مطالعه چهارم (بدون ESS) و پنجم (با ESS) ارائه شده است. نتایج

در این مطالعه فرض می‌شود که ریزشبکه بدون سیستم ذخیره‌ساز در مواجهه با وقوع اغتشاش سخت و قطعی مورد برنامه‌ریزی قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است در ساعت ۱۳ خطا رخ داده است و ریزشبکه از ساعت ۱۳ تا ۱۸ به مدت ۵ ساعت به صورت جزیره‌ای بهره‌برداری می‌شود و در این ساعات تولید واحدهای حرارتی درون ریزشبکه افزایش می‌یابد تا بار موجود را تامین کنند و به اینصورت سعی در برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه برای به حداقل رساندن هزینه‌های خاموشی آن دارند ولی با این حال ریزشبکه فقط قادر به تامین بخشی از بارهای موجود است. هزینه قطعی بارهای خاموش شده ۱۳.۷۵۶ دلار می‌باشد.

۵-۶- مطالعه پنجم

در ساعات قطعی ریزشبکه از شبکه اصلی، توان ذخیره شده در ESS دشارژ می‌شود و از قطع اجباری بخشی از بارها



شکل ۹- نتایج تغذیه بارها در زمان وقوع حادثه شدید در مطالعات چهارم و پنجم؛ الف) بارهای تامین شده ب) بارهای خاموش شده.

جدول ۳- خلاصه هزینه‌های ریزشکبه در مطالعات اول تا سوم با معیار قابلیت اطمینان ۰/۰.

پارامترهای مختلف	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
عمق دشارژ (%)	۰	۴۶	۲۶/۳
توان نامی ذخیره ساز (MW)	۰	۴/۶	۴/۴۹
انرژی نامی ذخیره ساز (MWh)	۰	۱۰	۱۷/۱۰۵
هزینه تولید توان در ریزشکبه (\$)	۲.۱۲۸.۴۲۶	۲.۱۳۳.۴۷۱	۲.۱۲۳.۹۹۸
هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست (\$)	۹۷.۴۶۹	۷۰۹	۸۱۵
درآمد فروش انرژی به شبکه بالادست (\$)	-۱.۱۸۱.۰۹۷	-۱.۴۰۴.۳۳۹	-۱.۵۱۰.۴۴۷
هزینه سرمایه گذاری ذخیره ساز (\$)	۰	۲۹۴.۰۰۰	۳۶۸.۲۰۶
هزینه کل (\$)	۱.۰۴۴.۷۹۸	۱.۰۲۳.۸۴۱	۹۸۲.۵۷۲

مدیریت کیفیت توان و تقاضای بار در ساعات اوج مصرف، در بهبود تاب‌آوری شبکه‌های قدرت می‌تواند نقش موثری ایفا کند.

۵-۷- آنالیز حساسیت

در این زیربخش سه مقدار مختلف برای شاخص قابلیت اطمینان ریزشکبه یعنی ۰/۰، ۰/۱ و ۰/۲ روز بر سال در نظر گرفته شده است. با تغییرات آن‌ها، برنامه‌ریزی ESS جهت تامین معیار قابلیت اطمینان ریزشکبه مقداری تغییر می‌کند. جدول ۳ خلاصه‌ای از نتایج مربوط به مطالعات اول تا سوم با معیار قابلیت اطمینان ۰/۰ روز بر سال برای مقایسه بصورت یکجا ارائه داده است. این معیار قابلیت اطمینان بیانگر این است که هیچ قطعی در شبکه رخ نخواهد داد و شبکه بیشترین قابلیت اطمینان را خواهد داشت. اندازه مطلوب ESS در ریزشکبه مشخص می‌شود تا هزینه کل ریزشکبه را در طول مدت برنامه‌ریزی کمینه کند. ESS با ذخیره‌سازی انرژی در ساعاتی که قیمت برق ارزان است و با ارائه توان کم هزینه به بارهای محلی منجر به کاهش نیاز به تولید محلی یا واردات توان از شبکه اصلی می‌شود. علاوه بر این، برنامه مدیریت مصرف بار در ریزشکبه

بدست آمده نشان می‌دهد که ESS با ذخیره‌سازی انرژی در ساعاتی که قیمت برق ارزان است و با ارائه توان کم هزینه در مواقع وقوع خطا و قطعی برق موجب کاهش نیاز به واردات توان از شبکه اصلی و همچنین کاهش هزینه خاموشی بارها می‌شود. در این شکل بارهای تامین شده و بارهای قطع شده در بازه وقوع خطا برای حالت‌های سه و چهار نشان داده شده است. به هنگام وقوع خطا و جزیره‌ای شدن میکروگرید، ۳۴/۳ MW از بارها خاموش می‌شوند که ESS ۵۲٪ از بارهای خاموش شده در هنگام وقوع خطا را تغذیه می‌کند و بارهای خاموش شده را به ۱۶/۶ MW کاهش می‌دهد.

نتایج ذکرشده بیانگر این است که مشارکت ESS در کنار منابع تولید تجدیدپذیر با ذخیره‌سازی انرژی در ساعاتی که قیمت برق ارزان است و دشارژ آن در زمان گرانی برق یا ساعات احتمالی وقوع خطا، سود اقتصادی ریزشکبه را بهبود و تاب‌آوری شبکه را با کاهش قطع بار افزایش می‌دهد. در مطالعه پنجم از طریق ESS بخش زیادی از بارهای خاموش شده در مطالعه چهارم تغذیه می‌شوند. بنابراین ذخیره‌ساز علاوه بر کاهش آلاینده‌های زیست محیطی، تبعیت از بار،

جدول ۴- خلاصه هزینه‌های ریزشکبه در مطالعات اول تا سوم با معیار قابلیت اطمینان ۰/۱.

پارامترهای مختلف	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
عمق دشارژ (%)	۰	۴۶	۲۶/۳
(MW) توان نامی ذخیره ساز	۰	۴/۶	۴/۴۹
(MWh) انرژی نامی ذخیره ساز	۰	۱۰	۱۷/۱۰۵
هزینه تولید توان در ریزشکبه (\$)	۲.۱۲۵.۱۰۰	۲.۱۳۳.۵۰۰	۲.۱۲۴.۱۰۰
هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست (\$)	۹۷.۴۶۹	۷۰.۹	۸۱.۵
درآمد فروش انرژی به شبکه بالادست (\$)	-۱.۱۹۹.۵۳۳	-۱.۴۰۹.۹۲۳	۱.۵۲۶.۲۹۷
هزینه سرمایه گذاری ذخیره‌ساز (\$)	۰	۲۹۴.۰۰۰	۳۶۸.۲۰۶
هزینه کل (\$)	۱.۰۲۳.۰۳۶	۱.۰۱۸.۲۸۶	۹۶۶.۸۲۴

جدول ۵- خلاصه هزینه‌های ریزشکبه در مطالعات اول تا سوم با معیار قابلیت اطمینان ۰/۲.

پارامترهای مختلف	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
عمق دشارژ (%)	۰	۴۶	۲۶/۳
(MW) توان نامی ذخیره ساز	۰	۴/۶	۴/۴۹
(MWh) انرژی نامی ذخیره ساز	۰	۱۰	۱۷/۱۰۵
هزینه تولید توان در ریزشکبه (\$)	۲.۱۲۳.۵۰۰	۲.۱۳۳.۵۰۰	۲.۱۲۴.۱۰۰
هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست (\$)	۹۷.۴۶۹	۷۰.۹	۸۱.۵
درآمد فروش انرژی به شبکه بالادست (\$)	۱.۲۲۴.۴۰۰	۱.۴۳۸.۳۷۱	۱.۵۴۱.۸۸۳
هزینه سرمایه گذاری ذخیره‌ساز (\$)	۰	۲۹۴.۰۰۰	۳۶۸.۲۰۶
هزینه کل (\$)	۹۹۶.۵۶۹	۹۸۹.۸۳۸	۹۵۱.۲۳۸

ریزشکبه به صورت خطی افزایش و هزینه بهره‌برداری ریزشکبه کاهش می‌یابد. در واقع اندازه مطلوب ESS، منجر به کاهش هزینه کل ریزشکبه می‌شود. همچنین برای دستیابی به یک مسئله واقعی‌تر و نتایج دقیق‌تر، از یک مدل تصادفی برای لحاظ کردن عدم قطعیت‌های سیستم فوتوولتائیک، توربین بادی و بارهای الکتریکی استفاده شده است. همچنین بهره‌برداری از ریزشکبه در دو وضعیت متصل به شبکه اصلی (عادی) و جزیره‌ای (بحرانی) بررسی شده است. بررسی‌های عددی ارایه شده نشان می‌دهد که این منابع ذخیره‌ساز به عنوان پشتیبان در سیستم‌های قدرت ایفای نقش می‌کنند که می‌توانند عملکرد شبکه را بهبود و هزینه‌های بهره‌برداری شبکه را کاهش دهند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از ESS می‌تواند ضریب خطای توان برنامه‌ریزی شده توسط بهره‌بردار شبکه را کاهش دهد. به این معنا که با وجود ESS، میزان خطا در پیش‌بینی و مدیریت توان تولیدی و مصرفی کمتر شده و شبکه می‌تواند با پایداری بیشتری به فعالیت خود ادامه دهد. در واقع ESS با ذخیره‌سازی انرژی در ساعاتی که قیمت برق ارزان است و با ارائه توان کم هزینه در مواقع

منجر به کاهش هزینه کل ریزشکبه گردیده و سرمایه‌گذاری اضافی ریزشکبه به منظور تامین پیک بار را مدیریت می‌کند و سود اقتصادی ریزشکبه را افزایش می‌دهد. همانطور که نتایج در جدول ۴ و ۵ ارائه شده است، داشتن شاخص قابلیت اطمینان کمتر (خاموشی کمتر) یا افزایش قابلیت اعتماد ریزشکبه منجر به افزایش هزینه کل ریزشکبه می‌شود. دلیل این موضوع هم اینست که برای داشتن قطعی بار کمتر باید بار ریزشکبه بخصوص در پیک بار شبکه به هر نحوی از قیمت گران بازار یا از واحدهای گران قیمت درون ریزشکبه تامین شود. بنابراین منجر به افزایش هزینه کل ریزشکبه خواهد شد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه جهت بهبود عملکرد کلی ریزشکبه و افزایش سود مولدها ارائه شده است. جهت تعیین اندازه بهینه ESS، هزینه کل شبکه حداقل‌سازی انجام شده است. هزینه کل شبکه شامل هزینه سرمایه‌گذاری ESS و هزینه بهره‌برداری ریزشکبه می‌باشد. هزینه‌های شبکه نسبت به اندازه ESS متغیر می‌باشند، به این صورت که با افزایش اندازه ESS، هزینه سرمایه‌گذاری

نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از مسئولین محترم دانشکده که همکاری لازم را به عمل آورده‌اند اعلام می‌دارند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

شقایق نایبی: روش‌شناسی، نرم افزار، اعتبارسنجی، تحقیق، منابع، استخراج و تحلیل داده‌ها، شبیه سازی
سید ابراهیم افجه‌ای: روش‌شناسی، نرم افزار، اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش، منابع

منابع مالی

در انجام این پژوهش هیچ منبع مالی مورد استفاده قرار نگرفته است.

وقوع خطا و حوادث شدید قطعی برق، موجب کاهش قطعی برق و هزینه خاموشی بارها می‌شود و ضمن افزایش قابلیت اطمینان، تاب‌آوری شبکه را نیز در برابر حوادث شدید و ناگهانی بهبود می‌دهد.

در این تحقیق، به دلیل عدم دسترسی به داده‌های دقیق از الگوی مصرف مصرف‌کنندگان در شرایط بحرانی، فرض شده است که رفتار مصرف‌کنندگان در هر دو وضعیت بهره‌برداری عادی و بحرانی یکسان باشد. با این حال، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده به جمع‌آوری داده‌های دقیق‌تر از رفتار مصرف‌کنندگان در شرایط بحرانی پرداخته شود. استفاده از تکنیک‌های پیشرفته‌تر مانند یادگیری ماشین و داده‌کاوی می‌تواند به توسعه مدل‌های دقیق‌تر و بهبود پیش‌بینی بار الکتریکی در شرایط بحرانی کمک کند. همچنین، بررسی و استفاده از توابع توزیع احتمال مناسب‌تر برای مدل‌سازی رفتار مصرف‌کنندگان در شرایط بحرانی می‌تواند به افزایش دقت نتایج و بهبود عملکرد فنی و اقتصادی ریزشبکه‌ها کمک کند.

تقدیر و تشکر

مراجع

- [1] S. Bahramirad, W. Reder, and A. Khodaei. "Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid." *IEEE Transactions on Smart Grid* 3, no. 4 (2012): 2056-2062.
- [2] K. Jalilpoor, R. Khezri, A. Mahmoudi, and A. Oshnoei. "Optimal sizing of energy storage system." 2019.
- [3] S. Saha, M.I. Saleem, and T.K. Roy. "Impact of high penetration of renewable energy sources on grid frequency behaviour." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 145 (2023): 108701.
- [4] X. Liu, T. Zhao, H. Deng, P. Wang, J. Liu, and F. Blaabjerg. "Microgrid energy management with energy storage systems: A review." *CSEE Journal of Power and Energy Systems* 9, no. 2 (2022): 483-504.
- [5] H. Tian, K. Wang, X. Cui, Z. Chen, E. Zhao, and S. Saeedi. "Multi-objective planning of microgrid based on renewable energy sources and energy storage system." *Journal of Energy Storage* 68 (2023): 107803.
- [6] M.A. Jirdehi, V. Sohrabi Tabar, S. Ghassemzadeh, and S. Tohidi. "Different aspects of microgrid management: A comprehensive review." *Journal of Energy Storage* 30 (2020): 101457.
- [7] S.S.K.R. Vaka, and S.K. Matam. "Optimal sizing of hybrid renewable energy systems for reliability enhancement and cost minimization using multiobjective technique in microgrids." *Energy Storage* 5, no. 4 (2023): e419.
- [8] N. Kumar, S. Dahiya, and K.P. Singh Parmar. "Multi-objective economic emission dispatch optimization strategy considering battery energy storage system in islanded microgrid." *Journal of Operation and Automation in Power Engineering* 12, no. 4 (2024): 296-311.
- [9] A. Bhatt, and W. Ongsakul. "Optimal techno-economic feasibility study of net-zero carbon emission microgrid integrating second-life battery energy storage system." *Energy Conversion And Management* 266 (2022): 115825.
- [10] I. Alsaidan, A. Khodaei, and W. Gao. "A comprehensive battery energy storage optimal sizing model for microgrid applications." *IEEE Transactions on Power Systems* 33, no. 4 (2017): 3968-3980.
- [11] P.N.D. Premadasa, and D.P. Chandima. "An innovative approach of optimizing size and cost of hybrid energy storage system with state of charge regulation for stand-alone direct current microgrids." *Journal of Energy Storage* 32 (2020): 101703.

- [12] A. Alamri, M. Alowaifeer, and A.P.S. Meliopoulos. "Energy storage sizing and probabilistic reliability assessment for power systems based on composite demand." *IEEE Transactions on Power Systems* 37, no. 1 (2021): 106-117.
- [13] H. Masrur, M.M. Gamil, M.R. Islam, K.M. Muttaqi, M.H. Lipu, and T. Senjyu. "An optimized and outage-resilient energy management framework for multicarrier energy microgrids integrating demand response." *IEEE Transactions on Industry Applications* 58, no. 3 (2022): 4171-4180.
- [14] L. Xu, K. Feng, N. Lin, A.T.D. Perera, H. Vincent Poor, L. Xie, C. Ji, X. Andy Sun, Qinglai Guo, and M. O'Malley. "Resilience of renewable power systems under climate risks." *Nature Reviews Electrical Engineering* 1, no. 1 (2024): 53-66.
- [15] A.M. Amani, and M. Jalili. "Power grids as complex networks: Resilience and reliability analysis." *Ieee Access* 9 (2021): 119010-119031.
- [16] E. Hossain, S. Roy, N. Mohammad, N. Nawar, and D.R. Dipta. "Metrics and enhancement strategies for grid resilience and reliability during natural disasters." *Applied Energy* 290 (2021): 116709.
- [17] M.T. Ameli, K. Jalilpoor, M.M. Amiri, and S. Azad. "Reliability analysis and role of energy storage in resiliency of energy systems." In *Energy Storage in Energy Markets*, pp. 399-416. Academic Press, 2021.
- [18] M.S. Khomami, K. Jalilpoor, M. Tourandaz Kenari, and M.S. Sepasian. "Bi-level network reconfiguration model to improve the resilience of distribution systems against extreme weather events." *IET Generation, Transmission & Distribution* 13, no. 15 (2019): 3302-3310.
- [19] Y. Guo, C. Guo, and J. Yang. "A resilience-oriented restoration model against attacks on cyber-physical power systems." *CSEE Journal of Power and Energy Systems* (2024).
- [20] K. Jalilpoor, A. Oshnoei, B. Mohammadi-Ivatloo, and A. Anvari-Moghaddam. "Network hardening and optimal placement of microgrids to improve transmission system resilience: A two-stage linear program." *Reliability Engineering & System Safety* 224 (2022): 108536.
- [21] S. Choudhury. "Review of energy storage system technologies integration to microgrid: Types, control strategies, issues, and future prospects." *Journal of Energy Storage* 48 (2022): 103966.
- [22] M.H. Elkholy, T. Senjyu, H. Metwally, M.A. Farahat, A.S. Irshad, A.M. Hemeida, and M.E. Lotfy. "A resilient and intelligent multi-objective energy management for a hydrogen-battery hybrid energy storage system based on MFO technique." *Renewable Energy* 222 (2024): 119768.
- [23] S.S. Fazlhashemi, M. Sedighzadeh, and M.E. Khodayar. "Day-ahead energy management and feeder reconfiguration for microgrids with CCHP and energy storage systems." *Journal of Energy Storage* 29 (2020): 101301.
- [24] M. Sedighzadeh, S.S. Fazlhashemi, H. Javadi, and M. Taghvaei. "Multi-objective day-ahead energy management of a microgrid considering responsive loads and uncertainty of the electric vehicles." *Journal of Cleaner Production* 267 (2020): 121562.
- [25] K. Jalilpoor, S. Nikkhah, M.S. Sepasian, and M. Ghobadi Aliabadi. "Application of precautionary and corrective energy management strategies in improving networked microgrids resilience: A two-stage linear programming." *Electric Power Systems Research* 204 (2022): 107704.
- [26] S. Bahramirad, and E. Camm. "Practical modeling of Smart Grid SMS™ storage management system in a microgrid." In *PES T&D 2012*, pp. 1-7. IEEE, 2012.
- [27] K. Jalilpoor, M.T. Ameli, S. Azad, and Z. Sayadi. "Resilient energy management incorporating energy storage system and network reconfiguration: A framework of cyber-physical system." *IET Generation, Transmission & Distribution* 17, no. 8 (2023): 1734-1749.