



Resilient-oriented Operation Strategies of Electrical Energy Distribution Networks in Critical Situations

Sina Samadi Gharehveran¹, Kimia Shirini^{2*}

¹Correspondence PhD in Electrical Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran Email Address: s.samadi@tabrizu.ac.ir

² PhD in Computer Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran., Email Address: k.shirini@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 27 November 2024

Received in revised form: 26 April 2025

Accepted: 20 September 2025

Available online: 21 August 2026

Keywords:

Distribution Networks

Mobile Energy Storage

Renewable Resources

Resilience

Weather Events

ABSTRACT

The structure and inherent quality of contemporary power systems have undergone significant changes due to the exponential increase in the penetration of renewable resources. Today's power systems face new technical barriers due to the utilization of power electronics-based distributed generation resources and the challenges in ensuring their secure operation. In addition to increased unpredictability and variability, the rising share of renewable resources in power generation has also led to a reduction in the rotational inertia of power systems. Nowadays, extreme weather events impose staggering economic and social costs on human societies. Despite the low probability of occurrence of such events, their considerable intensity and impact on the secure operation of power systems have drawn widespread attention toward enhancing network resilience. Mobile energy storage systems can improve grid resilience and security against events such as power outages, load fluctuations, equipment failures, and other unforeseen incidents in the power network. With their mobility capability, these systems can be rapidly deployed at required locations to help supply electricity during critical times. This paper discusses various measures to enhance power system resilience and outlines potential challenges for future research.

Cite this article: S. Samadi Gharehveran¹ and K. Shirini, "Resilient-oriented Operation Strategies of Electrical Energy Distribution Networks in Critical Situations," Journal of Passive Defence, vol. 17, no. 2, pp. 1-17, 2026.
DOI: <https://doi.org/10.47176/pd.2026.1487>



OPEN ACCESS

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.

Introduction

The structural characteristics and inherent quality of contemporary electric power systems have undergone considerable transformation as a consequence of the exponential growth in the penetration of renewable energy resources. The widespread integration of power-electronics-interfaced distributed generation units has introduced new technical challenges related to the secure and reliable operation of modern power systems. In addition to the unpredictability and variability associated with renewable generation, the increasing share of inverter-based resources has also reduced the rotational inertia of power systems, making them more sensitive to disturbances. In parallel with these technical developments, extreme weather events — including hurricanes, windstorms, and floods — have imposed considerable economic and social costs on human societies in recent decades. According to statistics reported by the National Centers for Environmental Information (NOAA), the United States alone has experienced 241 weather-related disasters since 1980, with a cumulative cost exceeding 1.6 trillion US dollars, and severe weather has been responsible for approximately 80% of major U.S. power outages between 2000 and 2023.

Despite the relatively low probability of occurrence of such high-impact events, their considerable severity and consequences for the secure operation of power systems have directed substantial attention toward enhancing the resilience of electrical networks. A well-known illustration of this vulnerability is Hurricane Sandy in late October 2012, which devastated a significant portion of the eastern United States power grid and left more than 7.5 million customers across 15 states without electricity for extended periods. Such events highlight the urgent need for modern power systems to develop enhanced capabilities and practical operational responses capable of minimizing societal disruption when severe incidents occur.

Motivated by this need, extensive research efforts have been devoted to reinforcing power systems against catastrophic events using a variety of techniques and tools. Prior studies have generally classified resilience-enhancement strategies into three broad categories according to their temporal scope relative to the disruptive event: measures implemented before the event (long-term, design-oriented strategies aimed at strengthening network infrastructure), measures implemented during the event (short-term operational strategies aimed at maintaining continuity of supply), and measures implemented after the event (rapid restoration strategies aimed at returning the system to normal operation). Portable and mobile energy storage systems have emerged as one of the most promising tools across all three categories, since their mobility allows them to be rapidly deployed at critical locations to support supply continuity during emergencies, thereby improving both the resilience and the security of the distribution network.

The objective of this study is to provide a comprehensive review of the operational strategies proposed in the literature for enhancing the resilience of electrical energy distribution networks in critical situations. The study organizes existing approaches according to their temporal orientation — long-term hardening and planning strategies, short-term operational strategies, energy-storage-based strategies, and rapid post-event restoration strategies — and discusses the underlying models, decision frameworks, and performance indices employed in each category. In doing so, this paper aims to identify open challenges and to serve as a structured reference that can guide future research on resilience-oriented operation of distribution networks.

Results and Discussion

The reviewed literature can be organized into four main streams, corresponding to the temporal stage at which resilience-enhancement actions are applied relative to a disruptive event.

Long-term operation-based strategies. The first stream comprises long-term, design-oriented approaches that focus on strengthening the physical infrastructure of the power system before an event occurs. Historical data on the consequences of past catastrophic events are used in long-term planning studies to determine the optimal hardening of critical and sensitive network components. Representative works include a tri-level optimal hardening framework for enhancing distribution system resilience against targeted attacks, integrated models for optimal design of critical infrastructure that account for equipment maintenance scheduling using Markov decision processes to withstand hurricanes, and optimal siting of distributed generation resources to convert conventional distribution feeders into self-sufficient microgrids. Other studies propose two-stage siting-and-routing models for mobile energy storage

systems, in which the first stage determines optimal storage locations under normal operating conditions while minimizing investment cost, and the second stage determines optimal routing of storage devices to reduce load curtailment and support faulted feeders during severe events. A further body of work incorporates uncertainty explicitly through robust optimization, including game-theoretic attacker-defender formulations for hurricane-resilient distribution network design, information-gap decision theory for optimal placement of series reactors, and two-stage robust programming for partitioning distribution systems into resilient microgrid clusters.

A closely related line of work integrates microgrid planning with demand response programs. In these studies, the microgrid planning problem is decomposed into two stages: sizing and siting of distributed and renewable generation units together with energy storage to convert passive distribution networks into active ones, and determination of optimal electrical boundaries of the resulting microgrids. The incorporation of critical-peak-pricing-based demand response programs, together with a Loss of Load Expectation (LOLE) reliability constraint, has been shown to substantially reduce required investment capacity while maintaining an acceptable reliability level, indicating that coordinated microgrid and demand-response planning yields greater operator profit and reduced excess investment compared with planning that neglects demand-side flexibility.

Short-term operation-based strategies. The second stream addresses short-term operational measures aimed at equipping the power system to manage an imminent event and to maintain continuous supply to consumers immediately before, during, and after its occurrence, typically at substantially lower cost than long-term hardening measures. Representative contributions include multi-level energy management strategies for microgrids that combine economic dispatch with resilience indices quantifying the fraction of restored load during islanded operation; two-level robust planning approaches for coordinating microgrid resources across grid-connected and islanded modes; scenario-based probabilistic frameworks employing dynamic line rating to mitigate wildfire-induced capacity reductions; and defensive islanding schemes that use component fragility curves to assess vulnerability during extreme weather. In the defensive islanding framework, a Severity Risk Index (SRI) is defined from the probability and impact of selected failure scenarios, and the network is partitioned into self-sustaining islands whenever the computed SRI exceeds a predefined threshold, thereby limiting the propagation of cascading outages while prioritizing protection of weak and fragile lines.

Other studies in this stream propose bi-level resilience-oriented algorithms for proactive microgrid dispatch in day-ahead markets, formulated as two-stage robust optimization problems and solved via decomposition techniques, showing improved system robustness together with reduced operating cost. Aggregated two-stage frameworks combining a preventive stage (generator re-dispatch and network switching) with a corrective stage (load shedding, islanding, and network reconfiguration) have also been shown to outperform independent preventive or corrective approaches. Because cyberattacks on control infrastructure represent an additional major threat to modern power systems, tri-level optimization models representing the conflict between system operator and attacker — determining, respectively, normal operation, optimal attack timing and location, and corrective post-attack actions — have been proposed to minimize unserved energy under worst-case attack scenarios, solved using two-stage robust optimization with column-and-constraint generation.

Energy-storage-based strategies. The third stream focuses specifically on the role of electrical energy storage as an emerging and versatile technology for resilience enhancement. Storage devices are highlighted as a strategic tool for improving resilience, with the amount of energy stored in batteries proposed directly as a resilience indicator, while additional attention is drawn to dynamic and transient fluctuations occurring during the transition of microgrids from grid-connected to islanded operation. Optimal models for frequency stability enhancement in islanded microgrids, formulated using AC power flow equations and convex programming for improved computational efficiency, jointly optimize generation dispatch, demand response implementation, and network reconfiguration subject to frequency constraints.

A central modeling tool throughout this stream is the fragility curve, which relates weather intensity such as wind speed or rainfall intensity leading to flooding — to the probability of component failure. Fragility-curve-based failure models allow identification of components at risk during upcoming simulation stages and can be calibrated using empirical outage statistics to reflect the real behavior of transmission and distribution equipment, including wind turbines. Failure rate models relating pole,

transformer, and overhead-line failure rates to storm wind speed, formulated using Poisson distributions, are used to probabilistically simulate storm occurrence and resulting component damage across the network.

Rapid restoration strategies. The fourth stream concerns rapid restoration of the power system to its pre-event operating condition, one of the key objectives for resilience enhancement. Approaches in this category include mixed-integer linear programming models for partitioning distribution networks into multiple microgrids to accelerate restoration by creating parallel restoration paths and localizing faults; post-event optimization models for coordinating repair crew scheduling, generator dispatch, and system energization rates while prioritizing load restoration; information-gap-decision-theory-based ascent techniques formulated via second-order cone programming to maximize load restoration under uncertainty; load restoration algorithms exploiting distributed generation and network reconfiguration, including waste-heat utilization from re-energization processes; and graph-based sequencing algorithms for determining optimal restoration order considering dynamic switching states. A further stream of restoration-related work addresses pre-positioning of resources ahead of flood events: risk-aware day-ahead stochastic scheduling models identify critical substations whose protection — for example using temporary plastic or sand-based flood barriers — maximizes network resilience, based on flood probability distributions, substation fragility and damage curves, and historical repair-time data, subject to a risk-aware objective balancing expected cost and Conditional Value-at-Risk.

Across all four streams, the reviewed literature consistently indicates that resilience enhancement cannot be achieved through a single measure applied at a single point in time; rather, meaningful improvement requires coordinated preventive, corrective, and restorative actions supported by uncertainty-aware optimization models. Mobile and portable energy storage systems recur across all three temporal stages — as planning assets in long-term siting problems, as flexible resources in short-term islanding and dispatch strategies, and as rapid-deployment tools supporting post-event restoration — underscoring their central role as a cross-cutting resilience-enhancement technology.

Conclusion

Natural disasters and malicious cyber intrusions constitute rare and largely unpredictable events with low probability of occurrence, yet they are capable of inflicting substantial and, in some cases, irreversible damage on the performance and infrastructure of power systems. In recent years, resilience has emerged as a distinct and increasingly prominent concept in power system research, complementing traditional reliability-oriented studies. This paper has presented a structured review of resilience-oriented operation strategies for electrical distribution networks, organized according to three temporal stages relative to a disruptive event: preventive (long-term) management, active (short-term operational) management, and corrective (post-event restoration) management.

The reviewed literature demonstrates that mobile and portable energy storage systems represent a particularly effective and versatile tool for load management within the distribution network, capable of contributing to resilience enhancement across all three of the aforementioned stages. During peak-load periods, energy previously stored in these systems can be dispatched to meet demand, thereby reducing the need for additional network infrastructure; during and after severe events, the same systems can be rapidly deployed and repositioned to supply critical loads, restore service to isolated portions of the network, and support defensive islanding strategies. Consequently, the deployment of portable energy storage systems can be regarded as a practical and cost-effective approach for simultaneously improving the resilience and security of electrical distribution networks.

This paper has provided a comprehensive overview of methods for enhancing the capability of distribution networks to withstand and recover from hazardous and emergency conditions, encompassing all three stages of resilience management identified in the literature. Several open challenges remain for future research, including the optimal siting of mobile energy storage systems specifically for flood-resilience enhancement of distribution networks — an area that, despite the considerable body of work reviewed in this paper, has not yet been comprehensively addressed. Further research directions include the development of coordinated, multi-stage resilience frameworks that jointly optimize hardening, operational, and restoration decisions under multiple correlated hazards, as well as the integration of increasingly data-driven and uncertainty-aware decision-making tools. It is anticipated that this review can serve as a comprehensive reference to support and guide future investigations in this field.

راهنمای بهره‌برداری تاب‌آور - محور شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی در شرایط بحرانی

سینا صمدی قره ورن^{۱*}، کیما شیرینی^۲

^۱دکتری مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: s.samadi@tabrizu.ac.ir

^۲دکتری مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: k.shirini@tabrizu.ac.ir

چکیده

ساختار و کیفیت ذاتی سیستم‌های قدرت معاصر به دلیل افزایش تصاعدی نفوذ منابع تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت، تغییرات قابل توجهی را تجربه کرده است. سیستم‌های قدرت امروزی به دلیل استفاده از منابع تولید پراکنده بر اساس الکترونیک قدرت و مشکلات در تضمین عملکرد ایمن آنها با موانع فنی جدیدی روبرو هستند. علاوه بر افزایش غیرقابل پیش‌بینی و تغییرپذیری، افزایش نسبت منابع تجدیدپذیر در تولید برق باعث کاهش اینرسی چرخشی سیستم‌های قدرت نیز شده است. امروزه حوادث آب‌وهوایی باعث تحمیل هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی سرسام‌آوری به جوامع بشری شده است. با وجود احتمال پایین وقوع این نوع رخدادها، شدت و تأثیر قابل توجه آنها بر روی عملکرد ایمن سیستم‌های قدرت باعث شده تا توجهات زیادی بر روی افزایش تاب‌آوری شبکه معطوف گردد. سیستم‌های ذخیره‌ساز قابل حمل می‌توانند در برابر حوادثی مانند قطعی برق، نوسانات بار، خرابی تجهیزات و سایر حوادث پیش‌بینی نشده در شبکه قدرت، تاب‌آوری و امنیت شبکه را افزایش دهند. این سیستم‌ها با قابلیت حمل و نقل، به سرعت می‌توانند در محل مورد نیاز نصب شده و به تأمین برق در زمان‌های بحرانی کمک کنند. این مقاله اقدامات مختلفی را برای افزایش تاب‌آوری سیستم قدرت مورد بحث قرار می‌دهد و چالش‌های بالقوه را برای تحقیقات آینده بیان می‌کند.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۳۰

کلیدواژه‌ها:

تاب‌آوری

شبکه‌های توزیع

ذخیره‌ساز انرژی سیار

منابع تجدیدپذیر

حوادث آب‌وهوایی

استناد: صمدی قره ورن، سینا، شیرینی، کیما، "راهنمای بهره‌برداری تاب‌آور - محور شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی در شرایط بحرانی"، نشریه پدافند غیرعامل، دوره ۱۷، شماره ۲، صفحات ۱۷-۱، ۱۴۰۵. DOI: <https://doi.org/10.47176/pd.2026.1487>

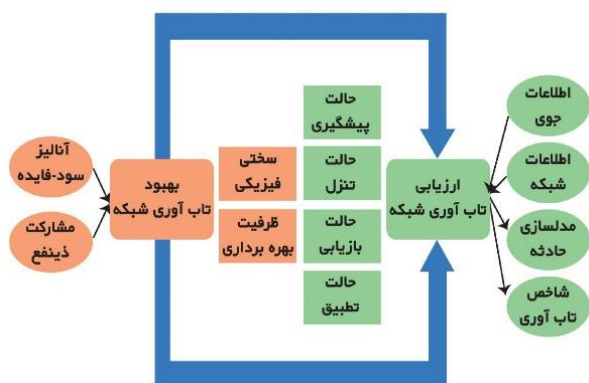
۱- مقدمه

مرکز ملی اطلاعات محیطی NOAA رویدادهای آب و هوایی ایالات متحده را که تأثیرات اقتصادی و اجتماعی زیادی دارند پیگیری می‌کند. از سال ۱۹۸۰، ایالات متحده ۲۴۱ بلایای آب و هوایی را متحمل شده است که هزینه تجمعی برای این ۲۴۱ رویداد بیش از ۱/۶ تریلیون دلار است. شرایط بد آب و هوایی حدود ۸۰ درصد از قطعی‌های عمده برق ایالات متحده را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ به خود اختصاص داده است. چنین قطعی‌هایی به این صورت تعریف می‌شود که حداقل ۵۰۰۰ خانه یا کسب و کار را تحت تأثیر قرار دهد یا خدمات حداقل ۳۰۰ مگاوات را قطع کند [۱].

نکته نگران‌کننده در مورد زیرساخت‌های برق این است که هنوز در برابر حوادث فاجعه‌آمیز کاملاً آسیب‌پذیر هستند. این بدان معنی است که نیروی مخرب آنها می‌تواند خسارات عظیمی را به سرعت و به طور گسترده ایجاد کند که می‌تواند منجر به اختلالات قابل توجهی در سیستم شود. رشد قدرتمند گستره جغرافیایی و ساختار فرسوده شبکه‌های برق موجود علت اصلی این موضوع است و مشکلات سیستم را تشدید می‌کند. به‌عنوان مثال، طوفان سندی در پایان اکتبر ۲۰۱۲ بخش قابل توجهی از شبکه برق شرق ایالات متحده را ویران کرد و منجر به قطع برق مداوم برای بیش از ۷/۵ میلیون نفر در ۱۵ ایالت شد [۲]. فراوانی این رویدادهای فاجعه‌بار شدید نشان‌دهنده نیاز مبرم به سیستم‌های قدرت مدرن برای توسعه ظرفیت‌های بیشتر و پاسخ‌های کاربردی به چنین رویدادهای شدید به‌منظور تأثیرگذاری معنادار است که اهداف جامعه را به حداقل برساند. اگرچه احتمال کمی برای این اتفاقات وجود دارد، تأثیر آنها بر شبکه برق و شدت آنها توجه زیادی را به خود جلب کرده است و مطالعات متعددی در حال کار برای کاهش تأثیر آنها بر عملکرد هستند. هیچ خطری در شبکه وجود نداشته است.

نیاز به سیستم‌های قدرت قابل اعتماد با توجه به تلاش‌های امروزی برای ایجاد یک سیستم انرژی پایدار و مقرون به صرفه و همچنین افزایش قابل توجه تقاضا برای انرژی الکتریکی افزایش یافته است. در نتیجه، محققان متعددی تلاش کرده‌اند تا از تکنیک‌ها و ابزارهای مختلف برای مقاوم‌سازی^۱ سیستم‌های قدرت در برابر حوادث فاجعه‌آمیز استفاده کنند. سه استراتژی متمایز

برای مدیریت رویدادهای بسیار غیرعادی به‌طور کلی در منابع قبلی ارائه شده است؛ شکل (۱) بر اساس محدوده زمانی آنها، ساختار کلی تکنیک‌های پیشنهادی برای بهبود تاب‌آوری سیستم‌های قدرت را نشان می‌دهد. این تصویر نشان می‌دهد که چگونه راه‌حل‌های پیشنهاد شده در مراجع قبلی را می‌توان در سه بازه زمانی اعمال کرد: قبل، در حین و بعد از حادثه. هر یک از این بازه‌های زمانی به بخشی از موضوع می‌پردازد. به‌عنوان مثال، اقدامات انجام شده قبل از یک حادثه بیشتر طول می‌کشد و در درجه اول بر تقویت مقاومت شبکه متمرکز است، اما اقدامات انجام شده در طول یک حادثه فوری‌تر هستند و هدف آنها تقویت تاب‌آوری شبکه است.



شکل (۱): رویکردهای مختلف برای افزایش تاب‌آوری سیستم‌های قدرت در دوره‌های زمانی مختلف [۳]

۲- روش‌های مبتنی بر بهره‌برداری بلندمدت

در سال‌های اخیر، محققان زیادی تلاش کرده‌اند تا با به‌کارگیری روش‌ها و ابزارهای مختلف تاب‌آوری شبکه‌های قدرت را نسبت به حوادث شدید آب و هوایی افزایش دهند. به‌طور کلی مراجع سه نوع رویکرد متفاوت برای مقابله با حوادث شدید نادر پیشنهاد کرده‌اند: دسته اول که روش‌های مبتنی بر طراحی‌های بلندمدت هستند، عمدتاً بر روی تقویت استحکام زیرساخت‌های سیستم قدرت برای مقاومت در برابر حوادث شدید متمرکز شده‌اند. عملکرد یک سیستم قدرت در برابر تهدیدهای شدید به‌عنوان عامل اصلی برای دستیابی به یک سیستم قدرت مقاوم‌تر در نظر گرفته می‌شود. در این راستا، مجموعه داده‌های تاریخی در مورد پیامدهای حوادث فاجعه‌بار قبلی می‌تواند در مطالعات برنامه‌ریزی بلندمدت مورد استفاده قرار گیرد تا با استقامت بیشتر سیستم قدرت در پاسخ به تهدیدات احتمالی آینده، گسترش یابد. روش

¹ Hardening

توسط محققان و متخصصان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعات نشان می‌دهند که در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از تأثیر حوادث بر عملکرد سیستم، می‌تواند نتایج واقع‌گرایانه‌تری را در مقایسه با مدل‌های قطعی ارائه دهد. به عنوان مثال، در مرجع [۷]، بهینه‌سازی مقاوم برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از حوادث طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش به سیستم قدرت اجازه می‌دهد تا در برابر وقوع حوادث غیرقابل پیش‌بینی انعطاف‌پذیرتر و مقاوم‌تر باشد. در این مطالعه، محققان رویکردی جامع را برای طراحی شبکه‌های توزیع باهدف افزایش تاب‌آوری در برابر وقوع طوفان ارائه می‌دهند. آنها از یک روش مبتنی بر بازی مهاجم - مدافع برای مدل‌سازی تأثیر طوفان بر سیستم استفاده می‌کنند. این روش بهینه‌سازی به جایابی منابع تولید پراکنده در شبکه کمک می‌کند تا خسارت ناشی از طوفان را به حداقل برساند.

در مرجع [۸]، محققان از نظریه تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی^۵ برای مسئله جایابی بهینه راکتورهای سری توزیع‌شده در شبکه انتقال استفاده کرده‌اند. هدف از این کار، جلوگیری از ایجاد تراکم در خطوط مهم و افزایش تاب‌آوری شبکه است. همچنین، در مرجع [۹]، افزایش تاب‌آوری و قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع با تقسیم آن به ریزشبکه‌های پراکنده مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، عدم قطعیت مسئله با استفاده از برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای مقاوم در نظر گرفته شده است تا شبکه توزیع بتواند در برابر حوادث و اختلالات احتمالی تاب‌آور باشد.

مسئله برنامه‌ریزی ریزشبکه‌ها می‌تواند به دو مرحله کلی تقسیم شود: مرحله اول تعیین اندازه و مکان بهینه واحدهای تولید پراکنده (یعنی واحدهای قابل اتصال، تجدیدپذیر و همچنین ذخیره‌ساز انرژی) در شبکه توزیع به منظور تبدیل شبکه توزیع متداول به شبکه‌های توزیع فعال و همچنین گام دوم باهدف تعیین مرزهای الکتریکی ریزشبکه‌ها در شبکه توزیع فعال به دست آمده است که در آن مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های متصل به یکدیگر وجود دارند که هر یک می‌تواند به عنوان یک سیستم قدرت مستقل در هر دو حالت متصل و جزیره‌ای عمل کند.

پیشنهادی برای تقویت استحکام^۱ اجزای سیستم قدرت عمدتاً پرهزینه بوده و بر روی مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های سیستم متمرکز است. به عنوان مثال، مرجع [۳] یک چارچوب سه سطحی را برای تعیین رویکرد طراحی بهینه برای افزایش مقاومت سیستم توزیع در برابر حملات سایبری پیشنهاد می‌کند. تصمیم‌گیری در مورد طراحی سیستم توزیع در این مطالعه در سطح اول باهدف افزایش تاب‌آوری اتخاذ شده است. بعد از مرحله دوم مشخص می‌کند که کدام حالت بیشترین آسیب را به سیستم وارد می‌کند. در نهایت در مرحله سوم با به کارگیری تکنیک‌های بهره‌برداری مانند سازماندهی مجدد و منابع تولید پراکنده سعی در کاهش آسیب به سیستم دارد. یک مدل تلفیقی برای بهترین طراحی ممکن زیرساخت‌های کلیدی سیستم قدرت که برنامه‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات را در نظر می‌گیرد در مرجع [۴] ارائه شده است. هدف از این تحقیق افزایش تاب‌آوری سیستم قدرت در برابر طوفان‌ها و گردبادهای شدید با استفاده از مدل فرایند تصمیم مارکوف است. هدف مرجع [۵] قراردادن منابع تولید پراکنده تا حد امکان بهینه برای تقویت استحکام شبکه‌های توزیع است. در این مرجع، استفاده از منابع پراکنده و تبدیل شبکه توزیع به یک ریزشبکه در تلاشی برای تقویت تاب‌آوری سیستم در برابر قطعی‌های ناشی از رویدادهای شدید آب‌وهوایی انجام شده است.

در مرجع [۶]، بهترین جایابی و مسیریابی برای ذخیره انرژی به منظور توسعه روشی عملی و مقرون به صرفه برای افزایش تاب‌آوری شبکه‌های توزیع پیشنهاد شده است. برای دستیابی به این هدف، یک مدل دو مرحله‌ای^۲ ایجاد شده است که در مرحله اول تمرکز بر یافتن بهترین مکان برای ذخیره انرژی در شرایط عادی شبکه و در عین حال به حداقل رساندن هزینه‌های سرمایه‌گذاری است. سپس، در مرحله دوم، مسیریابی ایده‌آل دستگاه ذخیره‌ساز^۳ به منظور کاهش مقدار بارهای قطع و افزایش تاب‌آوری سیستم در برابر حوادث شدید با تامین برق پشتیبان برای فیدرهای معیوب تکمیل می‌شود.

مطالعه تاب‌آوری^۴ سیستم‌های قدرت با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از شدت و زمان وقوع حوادث، موضوعی است که

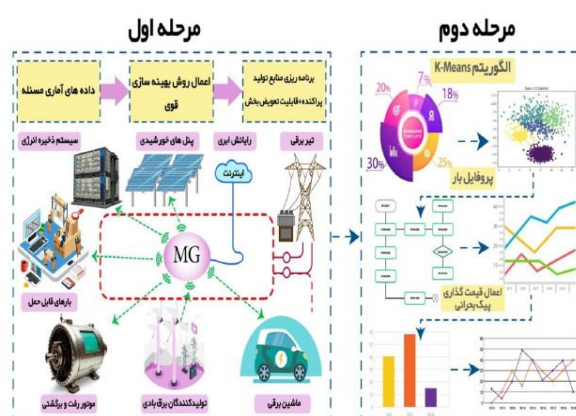
^۱ Strength^۲ Two-stage Model^۳ Storage^۴ Resiliency^۵ Information gap decision making

برای نشریه باتوجه به شکل (۳)، به منظور ساده تر شدن مسئله، هر پروفیل بار به چهار بازه زمانی مختلف تقسیم می شود. به عنوان مثال، در مشخصات بار فصل بهار، از ساعت ۱:۰۰ صبح تا ۱۰:۰۰ صبح به عنوان دوره دره، از ساعت ۱۱:۰۰ صبح تا ۱۴:۰۰ بعد از ظهر و ساعت ۱۶:۰۰ صبح تا ۱۹:۰۰ بعد از ظهر به عنوان پیک دوره، ساعت ۱۵:۰۰ بعد از ظهر به عنوان پیک بحرانی و همچنین ساعت ۲۰:۰۰ بعد از ظهر تا ساعت ۲۴ شب به عنوان یک دوره خارج از پیک در نظر گرفته می شود. بر اساس منحنی - های قیمت، قیمت های ۲۴ دلار برمگاوات ساعت، ۳۵ دلار برمگاوات ساعت و ۴۸ دلار برمگاوات ساعت به ترتیب در دوره - های دره، خارج از پیک و پیک قیمت محاسبه می شود. علاوه بر این، ۳۰ دلار بر مگاوات ساعت به عنوان قیمت ثابت در فروش انرژی الکتریکی تعریف می شود.

الاستیسیته تقاضا^۲ در برنامه های پاسخگویی بار به تغییرات قیمت برق اشاره دارد. این مفهوم نشان می دهد که تغییرات در قیمت برق چه تأثیری بر روی میزان تقاضای برق دارد. اگر الاستیسیته تقاضا بالا باشد، به این معنی است که تغییرات قیمت برق باعث تغییرات قابل توجهی در میزان تقاضا می شود. اما اگر الاستیسیته تقاضا پایین باشد، تغییرات قیمت برق تأثیر کمتری بر روی میزان تقاضا خواهد داشت. در برنامه های پاسخگویی بار، با استفاده از الاستیسیته تقاضا، تحلیل و پیش بینی میزان تغییرات تقاضا بر اساس تغییرات قیمت برق انجام می شود. این اطلاعات به شرکت های توزیع برق و مدیران شبکه کمک می کند تا برنامه های بهینه سازی بار را تنظیم کنند و بهترین استراتژی های تأمین و توزیع انرژی را در نظر بگیرند.

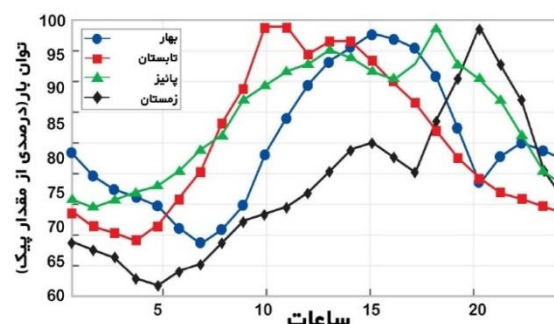
هدف اصلی این مرجع تعیین ساختار بهینه چندین ریزشبه با برنامه ریزی واحدهای مختلف منابع تولید پراکنده برای تبدیل شبکه توزیع مرسوم به شبکه توزیع فعال و همچنین تعیین بهینه مرزهای الکتریکی ریزشبه است. برنامه ریزی پیشنهادی تحت برنامه ریزی پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت گذاری پیک بحرانی به منظور کاهش هزینه های سرمایه گذاری و به تعویق انداختن سرمایه گذاری اضافی و همچنین مهار ریزشبه ها در مقابله با عدم قطعیت های عملیاتی متفاوت انجام می شود.

در این مرجع، مسئله برنامه ریزی ریزشبه باتوجه به معیار



شکل (۲): فلوچارت گام های مربوط به روش برنامه ریزی دومرحله ای پیشنهادی [۹]

هدف اصلی این مطالعه ترکیب مسئله برنامه ریزی ریزشبه ها و اجرای برنامه ریزی پاسخگویی بار^۱ به منظور کاهش هزینه های سرمایه گذاری ریزشبه ها در عین حفظ قابلیت اطمینان سیستم در سطح قابل قبول است. علاوه بر این، مدل پیشنهادی عدم قطعیت مسئله را با استفاده از یک روش بهینه سازی قوی در نظر می گیرد. در این راستا، یک مدل دومرحله ای ابتکاری برای تصمیم گیری در یک محیط عدم قطعیت پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی تحت شرایط عدم قطعیت هایی متشکل از ویژگی های تصادفی توان باد و قیمت بازار با استفاده از یک روش بهینه سازی دومرحله ای انجام شده است. در نهایت، شبیه سازی ها بر روی سیستم استاندارد IEEE ۳۳ با سه انجام شده و نتایج عددی نشان می دهد که برنامه ریزی هماهنگ ریزشبه ها و برنامه ریزی پاسخگویی بار می تواند سود سیستم را به میزان قابل توجهی افزایش داده و هزینه های سرمایه گذاری ریزشبه ها را کاهش داده و همچنین ریزشبه ها را در برابر عدم قطعیت ها حفظ کند.



شکل (۳): پروفیل بار روزانه برای فصل های مختلف [۹]

² Elasticity of demand

¹ Demand response

پاسخگویی بار و بدون برنامه‌ریزی پاسخگویی بار [۹] با بررسی و مطالعه بیشتر این پژوهش می‌توان دریافت که استفاده از برنامه‌ریزی پاسخگویی بار پیشنهادی باعث کاهش حجم سرمایه‌گذاری می‌شود و همچنین می‌تواند بر محدودیت‌های فیزیکی مانند قابلیت اطمینان سیستم تأثیر بگذارد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از برنامه‌ریزی پاسخگویی بار در مرحله برنامه‌ریزی مزایای بیشتری را به همراه دارد و هماهنگی مناسبی بین هزینه‌های برنامه‌ریزی و عملیات ایجاد می‌کند و همچنین انجام بهینه‌سازی ریزشکده‌ها را در برابر خطرات مرتبط با عدم قطعیت محافظت می‌کند و استحکام و تاب‌آوری شبکه را افزایش می‌دهد.

۳- روش‌های مبتنی بر بهره‌برداری کوتاه‌مدت

گروه دوم، بر خلاف دسته اول، شامل استراتژی‌های عملیاتی کوتاه‌مدت باهدف تجهیز سیستم قدرت برای مدیریت کارآمد حادثه قریب‌الوقوع است و به توانایی سیستم‌های قدرت در تأمین مداوم تقاضای برق مصرف‌کنندگان پس از حوادث شدید اشاره دارد [۱۸-۱۰]. در یک افق کوتاه‌مدت، عملکرد یک سیستم قدرت در پاسخ به یک رویداد فاجعه‌آمیز از طریق اقدامات مختلف عملیاتی مربوط به قبل، حین و بعد از وقوع حادثه تجزیه و تحلیل می‌شود. عملکرد یک سیستم قدرت مختل شده توسط یک حادثه به سیاست‌های بهره‌برداری آن و توانایی‌های آن برای انجام اقدامات اصلاحی مؤثر بر اساس ویژگی‌های بارهای مختلف و تولیدکنندگان مختلف قدرت وابسته است و عمدتاً هزینه‌های بسیار کم‌تری نسبت به دسته اول دارند. مرجع [۱۰] یک استراتژی مدیریت انرژی چندسطحی برای ریزشکده‌ها، قابل‌انطباق با شرایط عملیاتی مختلف را شرح می‌دهد. این استراتژی شامل توزیع بار اقتصادی برای بهینه‌سازی خروجی‌های منبع تولید پراکنده و ارزیابی مازاد یا کسری توان ریزشکده است. سپس، در لایه بالایی، یک مدیریت انرژی جامع توسط بهره‌بردار شبکه انجام می‌شود تا هزینه کل سیستم بهینه شود. یکی از ویژگی‌های کلیدی این روش، ارزیابی تاب‌آوری سیستم در حالت جزیره‌ای ریزشکده‌ها با استفاده از یک شاخص جدید است که میزان بار بازیابی شده را به کل بار سیستم نسبت می‌دهد.

نویسندگان در [۱۱] یک رویکرد برنامه‌ریزی دو سطحی مقاوم را برای مدیریت عملکرد ریزشکده‌ها در هر دو حالت متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای معرفی کرده‌اند. این رویکرد وضعیت

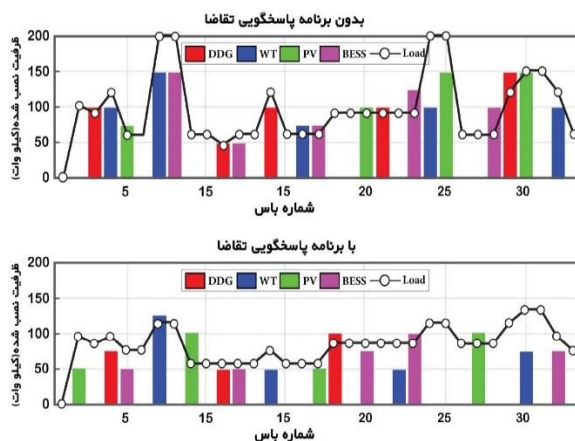
قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار گرفته است. شاخص $LOLE^1$ به‌عنوان محدودیت قابلیت اطمینان در این مسئله لحاظ شده است که به‌عنوان بار مورد انتظار تأمین نشده در ریزشکده‌ها در کل زمان برنامه‌ریزی تعریف شده است. این شاخص قابلیت اطمینان احتمالی به‌عنوان مبنایی دقیق و سازگار برای ارزیابی قابلیت اطمینان ریزشکده‌ها عمل می‌کند.

$$0 \leq LC_{s,t}^m \leq K\omega_{s,t}^m \quad (1)$$

$$LOLE = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{MG} \lambda^m \times T_{s,t}^m \times \omega_{s,t}^m \times LC_{s,t}^m \quad (2)$$

$$LOLE \leq LOLE^{Target} \quad (3)$$

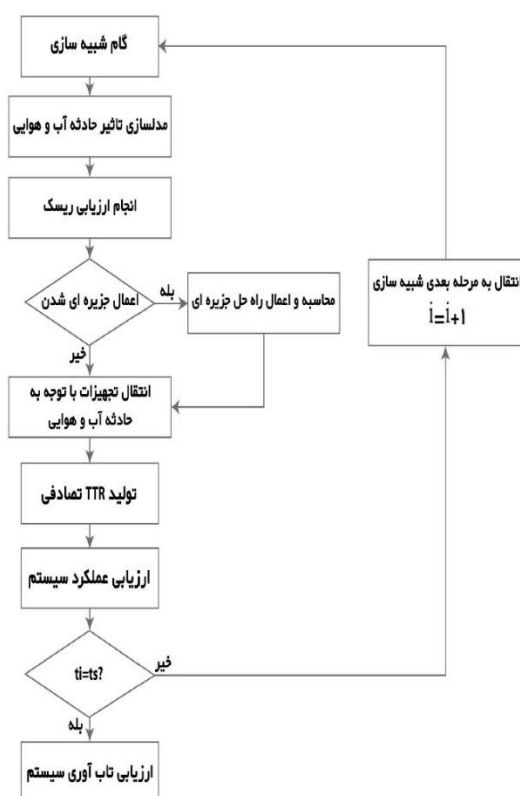
که در آن $LC_{s,t}^m$ نشان دهنده قطع بار ریزشکده m در زمان t و K بار قابل قبولی است که می‌توان آن را قطع کرد. λ^m نرخ شکست ریزشکده m و $T_{s,t}^m$ زمان بار تأمین نشده ریزشکده m در فصل s و زمان t است. $LOLE^{Target}$ نشان دهنده سطح قابل قبولی از معیار قابلیت اطمینان است. شکل (۴) تأثیر برنامه‌ریزی پاسخگویی بار پیشنهادی متکی بر قیمت‌گذاری پیک بحرانی بر هزینه برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با انجام برنامه‌ریزی پاسخگویی بار پیشنهادی، حجم سرمایه‌گذاری بر حسب ظرفیت نصب شده و تعداد واحدها در مقایسه با وضعیتی که برنامه‌ریزی پاسخگویی بار در نظر گرفته نمی‌شود، به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. بنابراین، در نظر گرفتن برنامه‌ریزی پاسخگویی بار در مرحله برنامه‌ریزی، سود بیشتری برای بهره‌بردار شبکه توزیع به همراه خواهد داشت و باعث کاهش سرمایه‌گذاری مازاد در شبکه می‌شود. لذا برنامه‌ریزی پاسخگویی بار می‌تواند به عنوان یک ابزار مفید و مؤثر برای کنترل خطر عدم قطعیت‌های عملیاتی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۴): محل و اندازه واحدهای تولید پراکنده با برنامه‌ریزی

¹ Loss Of Load Expectation

اولویت قرار می دهند. این رویکرد پیشگیرانه با تقسیم فعال سیستم به جزایر خودپایدار و جداسازی خطوط آسیب‌پذیر، انعطاف‌پذیری سیستم را با به حداقل رساندن آسیب‌های احتمالی افزایش می‌دهد. در سناریوهای بحرانی، انتقال استراتژیک استحکام سیستم را بیشتر تقویت می‌کند. روش پیشنهادی از چهار مدل اصلی تشکیل شده است: (الف) ارزیابی تأثیر حوادث آب‌وهوایی بر سیستم قدرت، (ب) ارزیابی ریسک برای تعیین SRI در طول رویداد آب‌وهوا، (ج) الگوریتم جزایر دفاعی برای یافتن راه‌حل بهینه جزیره‌سازی و (د) ارزیابی تاب‌آوری سیستم با و بدون الگوریتم جزیره‌سازی. شکل (۶) فلوجارت روش ارزیابی تاب‌آوری و افزایش آن را نشان می‌دهد.



شکل (۶): فلوجارت ارزیابی و روش افزایش تاب‌آوری با استفاده از

جزایر دفاعی [۱۳]

هدف از ارزیابی ریسک این است که تصمیمات آگاهانه در مورد اقدامات برای کاهش ریسک انجام شود. در این مرجع، ریسک توسط حوادث شدید آب‌وهوایی معرفی می‌شود و اقدامی که اعمال می‌شود علاوه بر اقدامات مرسوم نظیر پخش بار مجدد بعد از وقوع خطا یا قطعی بار و جزیره‌سازی دفاعی است. در هر مرحله شبیه‌سازی، از احتمال خرابی برآورد شده برای تعیین شاخه‌های آسیب‌پذیر استفاده می‌شود. همه شاخه‌هایی که دارای

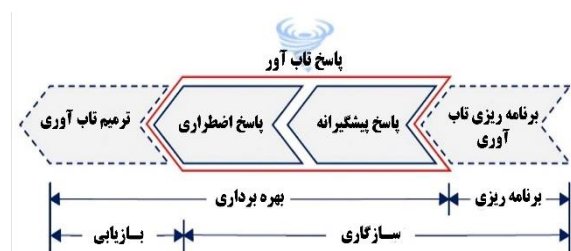
منابع تولید، نرخ شارژ ذخیره‌سازی انرژی و اجرای برنامه‌های پاسخ بار را در حالت عادی سیستم تعیین می‌کند. در مرحله بعد، پس از وقوع حادثه و ارزیابی وضعیت شبکه، تصمیمات اتخاذ شده در شرایط عادی برای کاهش میزان عدم تعادل بار در حالت جزیره ای ریزش‌بکه‌ها مجدداً ارزیابی می‌شوند. این مقاله استفاده از شاخص وقفه در حالت جزیره ای را به عنوان معیاری برای ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم مورد بحث قرار می‌دهد. در مرجع [۱۲]، محققان به بررسی بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع در برابر آتش‌سوزی پرداخته‌اند. آنها یک برنامه‌ریزی احتمالاتی مبتنی بر سناریو را پیشنهاد می‌کنند که در آن از ادوات نرخ بارگذاری خطوط پویا برای افزایش ظرفیت قابل انتقال خطوط شبکه و جبران کاهش توان عبوری به دلیل آتش‌سوزی استفاده می‌شود. با این روش، تاب‌آوری سیستم در برابر آتش‌سوزی به طور چشمگیری بهبود می‌یابد. همچنین، در این مطالعه، عدم قطعیت‌های تابش خورشید، سرعت و جهت وزش باد که بر پیشروی آتش‌سوزی تأثیر مستقیم دارند، با استفاده از مدل‌سازی سناریو محور در نظر گرفته شده‌اند. برای کاهش زمان اجرای برنامه، از الگوریتم کاهش سناریو استفاده شده است.

مراحل	وظایف
تولید سناریو و الگوریتم کاهش	- تولید سناریوهای فراوان با استفاده از روش مونت کارلو - کاهش سناریو ها با استفاده از روش کاهش سناریو پسرو
آماده سازی داده برای مسئله بهینه سازی	- محاسبه میزان مصرف - محاسبه تولید یا دو خورشید - محاسبه پارامتر های موثر بر تولیدات
بهینه سازی بهره برداری سیستم توزیع	حل مسئله تصادفی برای افزایش تاب آوری شبکه توزیع

شکل (۵): چارچوب روش پیشنهادی [۱۲]

در مرجع [۱۳]، محققان یک طرح جزیره‌سازی دفاعی را برای جلوگیری از حوادث آبشاری در سیستم قدرت هنگام وقوع حوادث شدید پیشنهاد می‌کنند. محققان یک روش متمرکز بر انعطاف‌پذیری را برای سیستم‌های قدرت پیشنهاد می‌کنند که از منحنی‌های شکنندگی تجهیزات برای ارزیابی آسیب‌پذیری‌ها در طول رویدادهای شدید آب و هوایی استفاده می‌کند. آنها یک شاخص ریسک را برای هدایت استراتژی‌های جزیره ای دفاعی معرفی می‌کنند و حفاظت از خطوط ضعیف و شکننده را در

طریق استفاده از بهینه‌سازی مقاوم دومرحله‌ای محاسبه شده و با استفاده از روش‌های تجزیه حل شده است. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد توانایی سیستم را برای مقاومت در برابر چالش‌ها و هم‌زمان بهینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی به میزان زیادی افزایش می‌دهد. مرجع [۱۵] یک رویکرد تجمیع شده دومرحله‌ای را باهدف تقویت تاب‌آوری شبکه‌های قدرت معرفی می‌کند. مرحله پیشگیرانه شامل تنظیم خروجی ژنراتور و سوئیچینگ شبکه است، درحالی‌که مرحله اصلاحی شامل کاهش بار، جزیره سازی و پیکربندی مجدد شبکه است. هدف اولیه افزایش پاسخگویی سیستم به حوادث است، درحالی‌که هدف ثانویه بر کاهش حادثه تمرکز دارد. نتایج نشان می‌دهد که ادغام اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی راه‌حل‌های برتر و بهینه‌تری را در مقایسه با روش‌های مستقل به دست می‌دهد.



شکل (۷): روش افزایش تاب‌آوری با استفاده از جزایر دفاعی [۱۵]

اگر هدف مرحله اول برنامه‌ریزی افزایش آمادگی سیستم برای رویارویی با حادثه بوده و هدف مرحله دوم کاهش خسارت‌های ناشی از وقوع رخداد موردنظر است. شبکه‌های انرژی الکتریکی در حالت پیشگیرانه برای برآوردن تمام خواسته‌ها بدون نقض هیچ‌گونه محدودیت‌های عملیاتی کار می‌کنند. از نقطه‌نظر اقتصادی، یعنی هزینه عملیات سیستم بهینه است. اما برای تاب‌آوری شبکه، هزینه کاهش بار در حالت بحرانی نیز باید در حالت پیشگیری در نظر گرفته شود؛ لذا تابع هدف در پاسخ پیشگیرانه به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\min \sum c_g p_g^a + \sum c_d p_{d,s}^c \quad (5)$$

مقاله باید شامل که در آن c_g قیمت پیشنهادی ژنراتور، c_d هزینه قطع بار d ، p_g^a توان خروجی ژنراتور g در حالت پیشگیرانه و $p_{d,s}^c$ توان قطع شده بار d در حالت بحرانی است.

افزایش قابلیت‌های شناختی سیستم‌های قدرت و ایجاد معماری‌های کنترل دیجیتال تأثیر قابل‌توجهی بر استحکام و قابلیت اطمینان سیستم دارد. سیستم‌های اتوماسیون کنترل از راه دور بستری را برای مدیریت کارآمد و مناسب سیستم قدرت

احتمال خرابی بیشتر از یک آستانه احتمال شکست مشخص هستند، به‌عنوان شاخه‌های آسیب‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند و برای تولید همه سناریوهای شکست احتمالی استفاده می‌شوند. اگر تعداد اجزای آسیب‌پذیر N باشد، تعداد سناریوهای شکست احتمالی 2^N است. از سناریوهای شکست ایجاد شده، فقط آن‌هایی که احتمال بیشتری نسبت به آستانه از پیش تعیین شده دارند (یعنی K سناریو) انتخاب می‌شوند. آستانه‌ها به بهره‌بردار سیستم بستگی دارند و معیارهای امنیتی که باید برآورده شوند را نشان می‌دهند. هنگام تعیین این آستانه‌ها، یک موازنه بین پیچیدگی محاسباتی و سطح ایمنی باید تحقق یابد چون پیچیدگی محاسباتی با سطح امنیتی به دلیل تعداد بالای سناریوهای موجود در فرآیند ارزیابی ریسک افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، هرچه آستانه احتمال شکست کمتر استفاده شود، تعداد شاخه‌های آسیب‌پذیر بیشتر است و بنابراین، تعداد سناریوهای که باید در نظر گرفته شوند بیشتر است. با استفاده از تأثیر و احتمال سناریوهای شکست انتخاب شده، شاخص شدت خطر^۱ (SRI) تعریف می‌شود:

$$SRI = \sum_{K=1}^K P_K \times Im_K \quad (4)$$

روشی که در آن P_K احتمال سناریو K و Im_K تأثیر سناریو k و K مجموعه‌ای از سناریوهای شکست انتخاب شده است. جزیره‌سازی دفاعی برای جلوگیری یا کاهش گسترش خسارات آبشاری اعمال می‌شود. از SRI برای کمک به بهره‌بردار سیستم برای تصمیم‌گیری در مورد زمان استفاده از جزایر دفاعی استفاده می‌شود. اگر ضریب شدت خطر محاسبه شده (اندازه‌گیری شده برحسب مگاوات ساعت، مانند میزان قطع بار) بزرگ‌تر از آستانه از پیش تعیین شده (SRI_{thres}) باشد، در این صورت به بهره‌بردار سیستم برای فعال‌سازی جزایر دفاعی اطلاع داده می‌شود.

ریزشبکه‌ها با توانایی عملکرد مستقل و تأمین برق برای کاربران در مواقع بحرانی، تاب‌آوری سیستم قدرت را تا حد زیادی افزایش می‌دهند. محققان در مرجع [۱۴] یک الگوریتم دو لایه‌ای تاب‌آور محور را برای کنترل فعال ریزشبکه‌ها در بازارهای روز - پیش‌رو با هدف بهینه‌سازی آمادگی سیستم در صورت وقوع فاجعه معرفی کردند. این استراتژی پیشنهادی مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها را قبل از وقوع حادثه بهینه می‌کند تا وقفه‌های برق پس از فاجعه را به حداقل برساند. عدم قطعیت‌های مسئله از

¹ Severity Risk Index

عادی است. در سطح میانی مهاجم زمان حمله و خطوطی را که باید به منظور بیشینه کردن انرژی تأمین نشده مورد حمله قرار گیرد را تعیین می کند. سطح پایین اقدامات بهره بردار را در حین ترمیم مدل می کند. برای حل مسئله از روش بهینه سازی قوی دومرحله ای با استفاده از یک روش تولید ستون و محدودیت استفاده شده است.

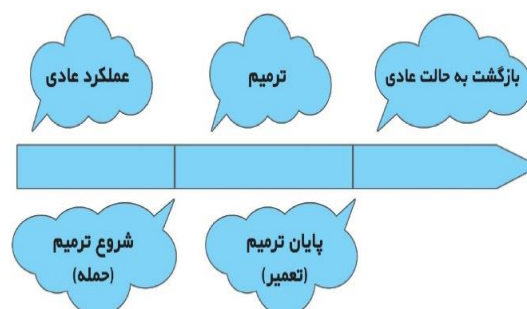
۴- روش های مبتنی بر بهره برداری با ذخیره سازهای انرژی

ذخیره سازهای انرژی الکتریکی به عنوان یک فناوری محوری در شبکه های قدرت در حال ظهور هستند و طیف متنوعی از خدمات را ارائه می دهند. سیستم های ذخیره سازی انرژی، این پتانسیل را دارند که به طور قابل توجهی تاب آوری سیستم های قدرت را با ارائه یک منبع قابل اعتماد از انرژی پشتیبان در شرایط بحرانی افزایش دهند. مرجع [۱۷] استفاده از دستگاه های ذخیره سازی را به عنوان یک اقدام استراتژیک برای افزایش تاب آوری برجسته می کند و مقدار انرژی ذخیره شده در باتری ها را به عنوان شاخص تاب آوری پیشنهاد می کند. این مقاله به بررسی سناریوهای مختلف برای درک تأثیر این رویکرد می پردازد و بر نیاز به پرداختن به نوسانات پویا و گذر در طول انتقال ریزشکها از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره ای تأکید می کند.

مرجع [۱۸] یک مدل بهینه را معرفی می کند که برای افزایش پایداری فرکانس در ریزشکها می که در حالت جزیره ای کار می کنند طراحی شده است. محققان از معادلات توزیع برق AC برای توسعه یک چارچوب جامع استفاده می کنند که سپس با استفاده از برنامه نویسی محدب برای بهبود کارایی محاسباتی و کیفیت راه حل فرموله می شود. هدف به حداقل رساندن بار سیستم و در نظر گرفتن محدودیت های فرکانس با تنظیم تولید منابع، اجرای برنامه های پاسخ بار و پیکربندی مجدد آرایش شبکه است.

مشخصات آب و هوایی (به عنوان مثال، سرعت باد یا شدت باران منجر به ایجاد سیلاب) برای بررسی احتمال خرابی اجزای سیستم قدرت توسط منحنی های شکنندگی مشخص می شود. این به تعیین اجزای سیستم که در مراحل شبیه سازی (به عنوان مثال، ساعت آینده یا روز آینده) به دلیل رویداد

ارائه می دهند که در سناریوهای بحرانی بسیار ارزشمند است. ساختارهای کنترل خودکار هم دید سیستم و هم سرعت تصمیم گیری را افزایش می دهند. یکی از موانع اصلی در سیستم های قدرت امروزی، خرابی عمدی و مخرب ناشی از حملات سایبری به سیستم های کنترلی است. این حملات پتانسیل ایجاد قطعی گسترده برق و خسارات قابل توجه را دارند. در مرجع [۱۶]، محققان یک رویکرد بهینه سازی سه سطحی را برای نشان دادن تضاد بین بهره بردار و حمله کننده، باهدف به حداقل رساندن مقدار انرژی قطع شده، پیشنهاد می کنند. این روش مورد بحث قرار گرفته است. در این روش، سطح بالایی بهینه سازی برای بهره برداری عادی سیستم انجام می شود، درحالی که سطح میانی راهبرد حمله را از نظر زمان و مکان تعیین می کند تا بیشترین تأثیر را بر عملکرد سیستم داشته باشد. در سطح پایینی، اقدامات اصلاحی برای جلوگیری از حملات سایبری و کاهش انرژی تأمین نشده سیستم شکل می گیرد.



شکل (۸): جدول زمانی وضعیت سیستم در طول ۲۴ ساعت [۱۶]



شکل (۹): چارچوب مدل پیشنهادی برای به حداقل رساندن انرژی

تأمین نشده در بدترین سناریو حمله به خطوط انتقال [۱۶] مسئله سطح بالا نشان دهنده اقدامات بهره بردارها در طول عملکرد

$$\lambda_{pole} = 10^{-4} e^{0.0421w} \quad (۶)$$

λ_{pole} نرخ خرابی دکل نسبت به طوفان است، که در آن w سرعت باد محل مورد نظر است.

$$\lambda_{Tr} = 2 \times 10^{-7} e^{0.083w} \quad (۷)$$

λ_{Tr} نرخ خرابی مدل آسیب ترانسفورماتور توزیع است.

$$\lambda_{con} = 8 \times 10^{-12} w^{0.173} \quad (۸)$$

نرخ خرابی خطوط هوایی شبکه‌های توزیع را می‌توان با معادله (۸) توضیح داد. که در آن λ_{con} نرخ خرابی خطوط توزیع با توجه به سرعت باد طوفان است. در این مطالعه فقط وقوع طوفان به صورت احتمالی مدل‌سازی شده است. برای تعیین مدل طوفان از یک عدد تصادفی برای تعیین مقدار مدل استفاده شده است. در این معادله این خطر طبیعی با استفاده از تابع توزیع پواسون مدل‌سازی شده است.

$$P_h = \frac{\exp(-\lambda) \times \lambda^h}{h!} \quad (۹)$$

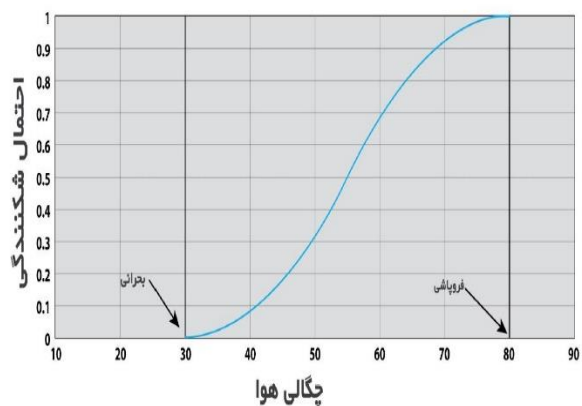
P تابع توزیع احتمال پواسون است که وقوع سالانه طوفان را نشان می‌دهد که در آن h تعداد طوفان میانگین است.

۵- بازگشت سریع به حالت قبل رویداد

بازیابی سریع سیستم قدرت به حالت عملکرد نرمال خود پس از وقوع حادثه، یکی از اهداف کلیدی برای بهبود تاب‌آوری سیستم‌های قدرت است. محققان در مراجع مختلف، بازیابی سیستم‌های قدرت را از جنبه‌های فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار داده‌اند تا روش‌هایی برای بازگشت سریع و کارآمد سیستم به حالت عادی پیدا کنند. این مطالعات شامل بررسی روش‌های مختلف بازیابی، ارزیابی تأثیر آن‌ها بر عملکرد سیستم قدرت و همچنین در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی و هزینه‌های مرتبط با بازیابی است. هدف اصلی این تحقیقات، دستیابی به بازیابی سریع، کارآمد و مقرون به صرفه سیستم قدرت پس از حوادث یا اختلالات است [۲۰-۳۱]. در مرجع [۲۰]، محققان یک رویکرد جدید برای تسریع در بازسازی شبکه‌های توزیع با تقسیم سیستم به ریزشبکه‌های متعدد ارائه می‌کنند. این روش که از طریق مدل‌سازی و برنامه‌ریزی خطی مختلط با محدودیت‌های عدد صحیح نشان داده شده است، باهدف به حداکثر رساندن بازیابی بار درحالی که به محدودیت‌های فنی پایبند است. نتایج نشان

آب‌وهوایی در معرض خطر هستند، کمک می‌کند. این امر که شدت تغییرات آب‌وهوایی را در سراسر شبکه برق می‌توان به طور دقیق پیش‌بینی کرد، امری قابل قبول است، زیرا در عمل خطای پیش‌بینی شدت آب‌وهوا در ساعات بعد معمولاً بسیار کم است. همچنین می‌توان از داده‌های آماری تجربی تأسیسات برای تنظیم منحنی شکنندگی برای انعکاس رفتارهای واقعی خطوط انتقال و توزیع، تجهیزات سیستم قدرت به عنوان مثال توربین‌های بادی استفاده کرد. مرجع [۱۹] یک منحنی شکنندگی برای اجزای سیستم قدرت ارائه کرده است. همچنین نرخ خرابی برای برخی از اجزای کلیدی سیستم انتقال و توزیع در این مرجع ارائه شده است. توابع شکنندگی توانایی تجهیزاتی الکتریکی را در برابر باد و سیلاب ناشی از طوفان را نشان می‌دهد. آسیب‌پذیری یا احتمال خرابی اجزای الکتریکی و حد فروپاشی آن‌ها با منحنی‌های شکنندگی توصیف می‌شود.

مدل خرابی پیشنهاد شده، نرخ خرابی این اجزا را به سرعت باد مربوط می‌سازد. تابع پواسون با در نظر گرفتن نرخ خرابی λ_{Tr} ، λ_{con} و λ_{pole} در مدل خرابی تجهیزات توزیع آورده شده است. به عنوان مثال، یک منحنی شکنندگی عمومی از اجزای سیستم قدرت مرتبط با سرعت باد، با توجه به محدودیت‌های بحرانی و فروپاشی قطعه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مدل آسیب سیستم قدرت، میزان خرابی قطعات را در شرایط طوفان نشان می‌دهد. با توجه به اینکه انواع مختلفی از تجهیزات سیستم توزیع مانند تجهیزات هوایی و زیرزمینی وجود دارد، بنابراین انواع مختلفی از مدل‌های آسیب می‌تواند وجود داشته باشد.



شکل (۱۰): چارچوب منحنی شکنندگی احتمال شکست یک جزء در

مقابل شدت آب‌وهوا [۱۹]

در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی مختلف، از جمله محدودیت‌های سیستم توزیع، محدودیت‌های ساختار شعاعی شبکه، محدودیت‌های بازآرایی، محدودیت‌های تشکیل ریزشبکه، و محدودیت‌های ساختاری و فنی سیستم.

هدف مرجع [۲۴]، تعیین توالی برای بازیابی بار سیستم با در نظر گرفتن موقعیت‌های دینامیکی است. هدف این مقاله کاهش قطعی برق در پی وقوع حادثه با پیاده‌سازی ریزشبکه‌ها و منابع تولید پراکنده است. استفاده از الگوریتم‌های گراف برای تعیین مسیرهای بازیابی سیستم و تخصیص اولویت به خطوط به کار گرفته شده است.

گرچه مقالات متنوعی برای بهبود تاب‌آوری پیشنهاد شده اما با این حال جایابی بهینه ذخیره‌ساز انرژی برای افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع در برابر سیلاب گزارش نشده است. تأثیر سیلاب را می‌توان با اقدامات پیشگیرانه مانند نصب سدهای پلاستیکی در اطراف پست‌های برق قبل از سیلاب کاهش داد. در این راستا، ضروری است که پست‌های مهم از نظر بار متصل و هزینه‌های تحمیل شده به سیستم شناسایی شوند. مرجع [۲۵] یک رویکرد تخصیص منابع تصادفی برای محافظت از پست‌های برق در برابر حوادث سیلاب یک روز قبل از حادثه ارائه می‌دهد. تابع توزیع احتمال سیلاب برای ایجاد چندین سناریوی سیلاب در هر پست مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از سناریوهای سیلاب و شکنندگی پست‌ها، خسارت‌ها و منحنی‌های زمان تعمیر به دست آمده از داده‌های تاریخی، احتمال خرابی، درصد خسارت، هزینه خسارت و زمان تعمیر پست‌ها برآورد می‌شود. یک مدل زمان‌بندی تصادفی آگاه به ریسک روز قبل، برای شناسایی پست‌های اساسی که حفاظت آن‌ها توسط سدهای بادی و پلاستیکی، تاب‌آوری شبکه را به حداکثر می‌رساند، پیشنهاد شده است.

$$\min \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \pi_s F_{ks} \times (I_k C_k + (1 - I_k) \bar{C}_k) - \beta \left(\zeta - \frac{1}{1 - \alpha} \sum_{s=1}^{\alpha} \pi_s \eta_s \right) \quad (10)$$

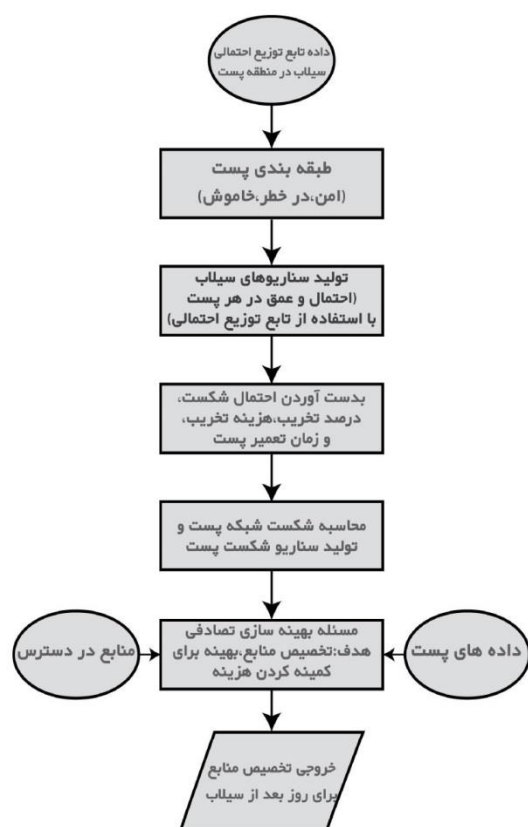
که در آن F_{ks} به k امین عنصر بردار شکست F_s برای سناریو s است. متغیر باینری I_k در صورت حفاظت پست k مقدار یک، در غیر این صورت مقدار صفر در نظر گرفته می‌شود. اگر I_k برابر یک باشد، پست k محافظت می‌شود و هزینه حفاظت مربوطه C_k به

می‌دهد که تبدیل شبکه توزیع به خوشه‌های ریزشبکه با ایجاد مسیرهای موازی برای بازیابی، بومی‌سازی خطاها و جلوگیری از انتشار آن‌ها در مناطق دیگر، سرعت و کیفیت بازیابی را افزایش می‌دهد.

مرجع [۲۱] به موضوع حیاتی بازیابی سیستم انتقال انرژی با اهداف دوگانه افزایش تاب‌آوری و به حداقل رساندن اختلال در سیستم می‌پردازد. این مقاله یک مدل بهینه پس از حادثه را ارائه می‌کند که برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تعمیر سیستم، محاسبات مکان‌یابی نیروگاه، و نرخ انرژی‌سازی سیستم خط طراحی شده است. قابل ذکر است که مقدار بار از دست رفته در طی یک حادثه به عنوان شاخصی برای اولویت بندی اهمیت بار معرفی شده است. برای اطمینان از دقت و سرعت، یک الگوریتم بهبود یافته برای افزایش کارایی محاسباتی در حل مسئله پیچیده استفاده می‌شود.

محققان در [۲۲] از رویکرد تصمیم‌گیری که بر شکاف اطلاعاتی متکی است برای ایجاد یک تکنیک صعود استفاده کرده‌اند که می‌تواند در برابر عدم قطعیت‌های ناشی از رویدادهای شدید مقاومت کند. وظیفه بازیابی سیستم‌های قدرت بسیار پیچیده است که شامل عوامل و محدودیت‌های متعددی است. مسئله با استفاده از برنامه‌نویسی مرتبه دوم برای دستیابی به بهترین راه حل کلی مدل شده است. هدف اصلی این مقاله به حداکثر رساندن بازیابی بار شبکه است و مقدار باری که بازیابی نشده باقی می‌ماند به عنوان معیاری برای ارزیابی کیفیت و اثربخشی استراتژی پیشنهادی استفاده شده است. این رویکرد از طیف وسیعی از تکنیک‌ها، از جمله ذخیره انرژی و منابع تولید پراکنده، برای خدمت به عنوان منابع پشتیبان و کاهش مقدار باری که بازیابی نشده است، استفاده می‌کند.

در مرجع [۲۳]، نویسندگان یک الگوریتم بازیابی بار را معرفی می‌کنند که از منابع تولید پراکنده استفاده می‌کند و استراتژی‌های بازآرایی شبکه را پیشنهاد می‌کند. این روش گرمای اضافی تولید شده توسط سیستم‌های نوسازی را برای افزایش بازیابی بار مهار می‌کند. هدف این الگوریتم بهینه‌سازی زمان بندی و قرارگیری واحدهای تولیدی در مدار توزیع، همراه با تعیین وضعیت بهینه سوئیچ‌های شبکه است. این مسئله پیچیده با استفاده از برنامه‌ریزی مخروطی مدل‌سازی می‌شود، با



شکل (۱۲): فلوچارت روش پیشنهادی [۲۵]

۶- نتیجه گیری

فجایع طبیعی و خرابکاری های سایبری اتفاقاتی نادر و غیرقابل پیش بینی با حداقل احتمال وقوع هستند، با این حال می توانند صدمات قابل توجه و جبران ناپذیری را به عملکرد و زیرساخت سیستم های قدرت وارد کنند. در سال های اخیر، مفهوم تازه ای در سیستم های قدرت تحت عنوان تاب آوری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. استفاده از سیستم های ذخیره ساز قابل حمل به عنوان یکی از راهکارهای مدیریت بار در شبکه قدرت نیز می تواند به بهبود کیفیت خدمات برق ارائه شده به مشتریان کمک کند. با استفاده از این سیستم ها، می توان در زمان های پیک بار، از بار ذخیره شده در این سیستم ها برای تأمین برق استفاده کرد و از این طریق، نیاز به ایجاد تجهیزات جدید در شبکه قدرت را کاهش داد؛ بنابراین، استفاده از سیستم های ذخیره ساز قابل حمل به عنوان یکی از راهکارهای افزایش تاب آوری و امنیت شبکه قدرت می تواند مفید باشد. این سیستم ها با قابلیت حمل و نقل، به سرعت می توانند در محل مورد نیاز نصب شده و به تأمین برق در زمان های اضطراری کمک کنند. این مقاله بررسی کاملی از افزایش توانایی شبکه های توزیع برای مقاومت و بازیابی

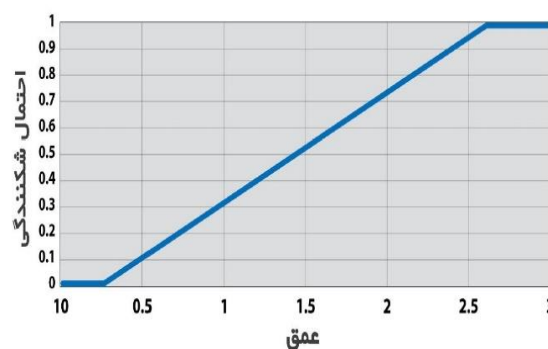
تابع هدف اضافه می شود. اگر Ik برابر صفر باشد، پست k محافظت نمی شود و هزینه $\bar{C}_k$ به شبکه تحمیل می شود. ضرایب α و β سطح اطمینان و ضریب وزنی هستند. متغیر پیوسته مقدار در ریسک و متغیر η_s یک مقدار همیشه مثبت است.

• اگر سناریوی خاصی با احتمال کم تحقق یابد، رویکرد آگاه به ریسک از هزینه بالا و تاب آوری کم جلوگیری می کند. یک روش کاهش سناریو برای ایجاد سناریوهای خرابی پست ها و کاهش هزینه های محاسباتی مسئله بهینه سازی توسعه یافته است.

• احتمال شکنندگی: منحنی شکنندگی پست که احتمال شکست یک پست در مقابل عمق سیلاب را نشان می دهد، برای تعیین احتمال خرابی هر پست در مورد سناریوی سیلاب استفاده می شود. نمونه ای از منحنی شکنندگی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

• خسارت: در صورت وقوع سناریوی سیلاب، از منحنی های خسارت برای تخمین درصد خسارت هر پست استفاده می شود.

• زمان تعمیر: درصد خسارت پست، زمان تعمیر آن را تحت تأثیر قرار می دهد.



شکل (۱۱): منحنی شکنندگی برای یک پست برق عادی تحت

سیلاب [۲۵]

اگر یک شرکت توزیع برق بتواند پست هایی که در اثر سیلاب خراب می شوند را شناسایی کند، می تواند با استفاده از منابع موجود از این پست ها محافظت کند. با این حال، چنین اطلاعاتی با توجه به پیچیدگی های پیش بینی و مدل سازی اعماق سیلاب برای شرایط تاریخی حال و آینده در معرض عدم قطعیت قابل توجهی قرار دارند. برای سیستمی با ۲۰ پست در منطقه هشدار، به عنوان مثال، بیش از یک میلیون سناریو می تواند ایجاد شود. برای کاهش بار محاسباتی، قبل از تدوین مدل تصادفی پیشنهادی، یک مرحله کاهش سناریو لازم است.

10.30511/pcdp.2025.2072671.1046.

[13] S. Samadi Gharehveran and K. Shirini, "Resilient-oriented Operation Strategies of Electrical Energy Distribution Networks in Critical Situations," *Passive Defense*, vol. 16, no. -, p. e210556, 2026 (in persian).

[14] A. Gholami, T. Shekari, S. Grijalva. "Proactive management of microgrids for resiliency enhancement: An adaptive robust approach." *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 470-480, 2017. doi: 10.1109/TSTE.2017.2740433

[15] G. Huang, et al. "Integration of preventive and emergency responses for power grid resilience enhancement." *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 6, pp. 4451-4463, 2017. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2685640

[16] S. Samadi Gharehveran, "Optimization of the number of batteries and their arrangement in electric vehicles based on multi-objective optimization," *Passive Defense*, vol. 16, no. 4, pp. 17-33, 2026 (in persian), doi: <https://doi.org/10.47176/PD.2026.1490>.

[17] A. Hussain, V. Bui, H. Kim. "A proactive and survivability-constrained operation strategy for enhancing resilience of microgrids using energy storage system." *IEEE Access*, vol. 6, pp. 75495-75507, 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2883418.

[18] A. Hayati, S. S. Gharehveran, and K. Shirini, "Electricity price forecasting with ensemble meta-models and SHAP explainers: a PCA-driven approach," *Sci Rep*, vol. 16, p. 6466, 2026, <https://doi.org/10.1038/s41598-026-35839-1>.

[19] S. M. Farshbaf, K. Shirini, S. S. Gharehveran, and A. Abdollahi, "Reducing Phase Lag and Noise in Residential Load Forecasting with a Hybrid Residual-Attention Model," *Algorithms*, vol. 19, no. 8, p. 661, 2026, doi: 10.3390/a19080661.

[20] Mishra, Dillip Kumar, et al. "A detailed review of power system resilience enhancement pillars." *Electric Power Systems Research* 230: 110223, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110223>

[21] S. Samadi Gharehveran, K. Shirini, M. Sarhangzadeh, and S. Gholinavaz, "A Review of Game Theory-based Approaches for Demand Side Management in Smart Energy Grids," *Power, Control, and Data Processing Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 28-37, 2026, doi: 10.30511/pcdp.2025.2072667.1045.

[22] T. Ding, et al. "A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration." *Applied energy*, vol. 199, pp. 205-216, 2017. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.012

[23] L. Che, M. Shahidehpour. "Adaptive formation of microgrids with mobile emergency resources for critical service restoration in extreme conditions." *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 742-753, 2019. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2866099

[24] N. S. S. Singh et al., "Artificial Neural Network-Based Adaptive Voltage Control of a Hybrid Zeta DC/DC Converter Using Multilayer Perceptron and Radial Basis Function Architectures With Back-Propagation Learning," in *IEEE Access*, vol. 14, pp. 105596-105622, 2026, doi: 10.1109/ACCESS.2026.3703319.

[25] Leandro, J., Cunneff, S., & Viernstein, L. "Resilience modeling of flood induced electrical distribution network failures: Munich, Germany." *Frontiers in Earth Science*, 9, 572925, 2021. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.572925>

[26] A. G. Oskouei, N. Abdolmaleki, A. Bouyer, B. Arasteh, and K. Shirini, "Efficient superpixel-based brain MRI segmentation using multi-scale morphological gradient reconstruction and quantum clustering," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 100, p. 107063, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.107063>

[27] K. Shirini, H. S. Aghdasi, and S. Saeedvand, "Modified imperialist competitive algorithm for aircraft landing scheduling problem," *The Journal of Supercomputing*, vol. 80, no. 10, pp.

در برابر خطرات و شرایط اضطراری ارائه می‌کند. این مطالعه شامل هر سه مرحله تاب‌آوری، یعنی مدیریت پیشگیرانه، مدیریت فعال و مدیریت اصلاحی است. این منبع می‌تواند به‌عنوان یک مرجع کامل برای تحقیقات آینده در این زمینه باشد.

۷- مراجع

[1] M. Abedini and H. Moazami, "Reconfiguration of electricity distribution networks to increase resilience and reliability using fuzzy objective functions and game theory," *Passive Defense*, vol. 15, no. 3, pp. 27-38, 2024 (in persian). DOR: 20.1001.1.20086849.1403.15.1.1.8

[2] L. Che, M. Khodayar, M. Shahidehpour, "Only connect: Microgrids for distribution system restoration," *IEEE Power Energy Magazine*, vol. 12, no. 1, pp. 70-81, 2014. doi: 10.1109/MPE.2013.2286317

[3] Y. Lin, Z. Bie. "Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding." *Applied Energy*, vol. 210, pp. 1266-1279, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.06.059

[4] A. Arab, et al. "System hardening and condition-based maintenance for electric power infrastructure under hurricane effects." *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 65, no. 3, pp. 1457-1470, 2016. DOI: 10.1109/TR.2016.2575445

[5] S. Samadi Gharehveran, G. Zadeh, and M. Nasiri, "Optimum operation of resilient multi-energy microgrids under low probability and high impact events," *Journal of Advanced Defense Science & Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 51-60, 2025 (in persian).

[6] M. Mirsadeghi and R. Ghaffarpour, "Improving the Resilience of Power Grids in the Face of Focused Attacks Using the Contingency Analysis," *Passive Defense*, vol. 13, no. 3, pp. 1-10, 2022 (in persian). 20.1001.1.20086849.1401.13.3.1.8

[7] R. Ghaffarpour, S. Sadi, S. Zamanian, and M. Mahmoudian, "Improving Electrical Distribution Systems Resilience by their Optimal and Adaptable Operation in the Presence of Mobile Power Sources," *Scientific Journal of Passive Defence*, vol. 14, no. 3, 2023 (in persian). 20.1001.1.20086849.1402.14.3.9.3

[8] S. S. Gharehveran, K. Shirini, S. C. Khavar, and A. Abdollahi, "Optimizing day-ahead power scheduling: a novel MIQCP approach for enhanced SCUC with renewable integration," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 12, p. 101022, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101022>.

[9] Lu, Xinhui, and Kaile Zhou. "A distributionally robust optimization approach for optimal load dispatch of energy hub considering multiple energy storage units and demand response programs." *Journal of Energy Storage* 78: 110085, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110085>

[10] A. Hussain, V. Bui, H. Kim. "A resilient and privacy-preserving energy management strategy for networked microgrids." *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2127-2139, 2018. doi: 10.1109/TSG.2016.2607422.

[11] S. Samadi Gharehveran and M. Nasiri, "Resilient planning against disturbances and optimal location determination for mobile energy storage systems in smart microgrids," *Passive Defense*, vol. 16, no. 2, pp. 69-80, 2025 (in persian). DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.2.6.2

[12] S. Samadi Gharehveran, "A review of energy management of multi-microgrid power systems in the presence of uncertainty of distributed generation resources," *Power, Control, and Data Processing Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 46-58, 2025, doi:

- 13782–13812, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-05999-w>
- [28] K. Shirini, H. S. Aghdasi, and S. Saeedvand, "A comprehensive survey on multiple-runway aircraft landing optimization problem," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, vol. 25, no. 4, pp. 1574–1602, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42405-024-00747-z>
- [29] K. Shirini, H. S. Aghdasi, and S. Saeedvand, "Multi-objective aircraft landing problem: a multi-population solution based on non-dominated sorting genetic algorithm-II," *The Journal of Supercomputing*, vol. 80, no. 17, pp. 25283–25314, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06385-2>
- [30] M. Ahrari, K. Shirini, S. S. Gharehveran, M. G. Ahsaee, S. Haidari, and P. Anvari, "A security-constrained robust optimization for energy management of active distribution networks with presence of energy storage and demand flexibility," *Journal of Energy Storage*, vol. 84, p. 111024, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111024>
- [31] S. S. Gharehveran, S. Ghassemzadeh, and N. Rostami, "Two-stage resilience-constrained planning of coupled multi-energy microgrids in the presence of battery energy storages," *Sustainable Cities and Society*, vol. 83, p. 103952, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103952>
- [32] S. S. Gharehveran, S. G. Zadeh, and N. Rostami, "Resilience-oriented planning and pre-positioning of vehicle-mounted energy storage facilities in community microgrids," *Journal of Energy Storage*, vol. 72, p. 108263, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108263>
- [33] A. Taherihajivand, K. Shirini, and S. Samadi Gharehveran, "Weed detection in fields using convolutional neural network based on deep learning," *Agricultural Engineering*, vol. 47, no. 1, pp. 129–142, 2024 (in persian). <https://doi.org/10.22055/agen.2024.45327.1688>