Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 2 – Summer 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Reveiw Article

An Analytical Review of PSO Algorithm Applications in Power System Flexibility and Resilience

Mohanad Faisal Abed Al-Safi[1], *Ph.D. Student*, Afshin Lashkarara[* 2], *Associate Professor*, Hajar Bagheri Tolabi[3], *Assistant Professor*

[1] Department of Electrical Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran, mohanad.alsafi@iau.ac.ir
[2] Department of Electrical Engineering, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran, Lashkarara@iau.ac.ir
[3] Department of Electrical Engineering, Khor.C., Islamic Azad University, Khorramabad, Iran, ha.btolabi@iau.ac.ir

Abstract:
The fundamental transformation of the power system in recent years, with the development of the penetration of renewable energy sources, microgrids and the spread of emerging loads such as electric vehicles, has created new challenges in the reliable and sustainable operation of the power system. Contrary to the significant environmental and economic benefits that these changes have brought, they have increased the level of uncertainty and fluctuations in operation. In such circumstances, the concepts of "flexibility" and "resilience" have been proposed as two key indicators of the performance of power systems. Flexibility refers to the ability of the system to quickly adapt to changes in normal operating conditions, while resilience focuses on the capacity of the system to withstand severe disturbances, reduce performance degradation and recover quickly after crises. The complexity of the issues related to these two concepts has caused the use of classical optimization methods to face limitations and has attracted the attention of researchers to meta-heuristic algorithms. Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm has gained a special place in power systems due to its simple structure, adaptive capabilities, and good performance in nonlinear and multi-objective problems. This article, with a review and analytical approach, comprehensively examines the application of PSO algorithm in increasing the flexibility and resilience of power systems. By analyzing 40 selected articles, first, basic concepts are recalled, then the role of PSO in flexible resource management and improving network resilience is analyzed. In the following, research gaps are identified and future research directions are suggested.

Keywords: Particle Swarm Optimization (PSO), Power System Flexibility, Power System Resilience, Demand Response, Metaheuristic Optimization, Microgrid, Uncertainty Modeling.

Received: 13 Jun. 2025
Revised: 21 Aug. 2025
Accepted: 27 Aug. 2025

*** Corresponding Author:** Dr. Afshin Lashkarara

Citation: M.F.A. Al-Safi, A. Lashkarara, H. Bagheri Tolabi, "An Analytical Review of PSO Algorithm Applications in Power System Flexibility and Resilience", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 2, pp. 85-105, August 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]

مقاله مروری

مروری تحلیلی بر کاربردهای الگوریتم PSO در انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت

مهند فیصل عبدالصافی [۱]، دانشجوی دکتری، افشین لشکرآرا[۲]، دانشیار، هاجر باقری طولابی[۳]، استادیار

۱- گروه برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، mohanad.alsafi@iau.ac.ir
۲- گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، Lashkarara@iau.ac.ir
۳- گروه برق، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران، ha.btolabi@iau.ac.ir

چکیده: دگرگونی اساسی سیستم قدرت در سال های اخیر، با توسعه نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر، ریزشبکه‌ها و گسترش بارهای نوظهور نظیر خودروهای برقی، چالش‌های جدیدی را در بهره‌برداری مطمئن و پایدار سیستم قدرت ایجاد کرده است.برخلاف مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی قابل‌توجهی که این تغییرات به همراه داشته‌اند، سطح عدم‌قطعیت و نوسانات بهره‌برداری را افزایش داده‌اند. در چنین شرایطی، مفاهیم «انعطاف‌پذیری» و «تاب‌آوری» به‌عنوان دو شاخص کلیدی عملکرد سیستم‌های قدرت مطرح شده‌اند.انعطاف‌پذیری به توانایی سیستم در تطبیق سریع با تغییرات شرایط بهره‌برداری عادی اشاره دارد، در حالی که تاب‌آوری بر ظرفیت سیستم برای مقاومت در برابر اختلالات شدید، کاهش افت عملکرد و بازیابی سریع پس از وقوع بحران‌ها تمرکز دارد. پیچیدگی مسائل مرتبط با این دو مفهوم، باعث شده تا استفاده از روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی با محدودیت مواجه شود و توجه پژوهشگران را به الگوریتم‌های فراابتکاری جلب نموده است. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)به دلیل ساختار ساده، قابلیت های تطابق و عملکرد مناسب در مسائل غیرخطی و چندهدفه، جایگاه ویژه‌ای در سیستم‌های قدرت یافته است.این مقاله با رویکردی مروری و تحلیلی، به بررسی جامع کاربرد الگوریتم PSO در افزایش انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت می‌پردازد. با تحلیل ۴۰ مقاله منتخب، ابتدا به یادآوری مفاهیم پایه پرداخته، سپس نقش PSO در مدیریت منابع انعطاف‌پذیر و بهبود تاب‌آوری شبکه‌ها تحلیل می‌شود. در ادامه، شکاف‌های پژوهشی شناسایی و مسیرهای آینده تحقیق پیشنهاد می‌گردد.

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، انعطاف‌پذیری سیستم های قدرت، تاب‌آوری سیستم های قدرت، پاسخگویی بار، بهینه‌سازی فراابتکاری، ریزشبکه، مدل سازی عدم قطعیت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۳/۲۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۵/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۵

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر افشین لشکرآرا
نشانی نویسنده مسئول: دزفول، کوی آزادگان، بلوار دانشگاه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دانشکده فنی، گروه برق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت امروزی در مواجهه با رخدادهای حدی و اختلالات زنجیره ای و افزایش عدم قطعیت از تولیدات تجدیدپذیر و بارهای نوظهور در حال گذار از ساختارهای متمرکز و قابل‌پیش‌بینی به شبکه‌هایی پیچیده، غیرمتمرکز و داده‌محور هستند [۱], [۲]. افزایش روز افزون منابع تولید پراکنده و نیز نفوذ بیش از پیش منابع تجدیدپذیر وابسته به شرایط محیطی و پیدایش الگوهای جدید مصرف انرژی، نظیر خودروهای برقی و پاسخگویی بار، ماهیت بهره‌برداری سیستم‌های قدرت را به‌طور بنیادین تغییر داده است. [۳] نتیجه مصاف این تغییرات و فرصت‌های ایجادشده، به ظهور چالش‌های جدی در حفظ تعادل تولید و مصرف و تضمین عملکرد پایدار شبکه از قبیل پیچیده‌شدن تصمیم‌های بهره‌برداری/بازیابی در شبکه توزیع فعال و ریزشبکه‌ها که معمولاً با قیود غیرخطی، چندهدفه و آمیخته (گسسته–پیوسته) همراه است، منتهی شده است [۴], [۵], [۶]. در گذشته، ارزیابی عملکرد سیستم‌های قدرت عمدتاً بر شاخص‌های قابلیت اطمینان مبتنی بود. هرچند این شاخص‌ها برای تحلیل خاموشی‌های متداول مناسب هستند، اما توانایی کافی برای توصیف رفتار سیستم در مواجهه با اختلالات شدید و کم‌احتمال با پیامدهای گسترده را ندارند. خرابی‌های زنجیره‌ای تجهیزات ، وقوع بلایای طبیعی، و نیز تهدیدات روزافزون سایبری نشان میدهد که سیستم‌های قدرت علاوه بر قابلیت اطمینان، نیازمند ویژگی‌های پیشرفته‌تری برای بقا و بازیابی هستند. از این رو، مفاهیم انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری به‌عنوان رویکردهای مکمل قابلیت اطمینان مطرح شده‌اند. انعطاف‌پذیری به توان سیستم در تطبیق سریع با تغییرات بهره‌برداری در شرایط عادی اشاره دارد، در حالی که تاب‌آوری بر مقاومت سیستم در برابر اختلالات شدید و بازگشت سریع به سطح عملکرد قابل‌قبول تمرکز می‌کند[۷], [۸], [۹] .این دو مفهوم اگرچه به‌هم مرتبط هستند، اما از نظر افق زمانی، اهداف و شاخص‌های ارزیابی تفاوت‌های اساسی دارند. در حل مسائل مرتبط با انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری، به دلیل ماهیت غیرخطی، چندهدفه و همراه با عدم‌قطعیت بالا، نیاز به استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی پیشرفته خودنمایی می کند. در این میان، الگوریتم‌های فراابتکاری، به‌ویژه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرا(PSO) ، به‌طور چشمگیری در تحلیل سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. قابلیت همگرایی مناسب در کنار سادگی ساختار و نیز امکان ترکیب با روش‌های داده‌محور، PSOرا به گزینه‌ای مناسب برای استفاده در تحلیل این سیستم ها تبدیل نموده است[۱], [۵], [۸] [۱۰]. هدف این مقاله، ارائه یک مرور جامع و یکپارچه از نقش و گستره کاربرد الگوریتم PSO در افزایش انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت است. برخلاف بسیاری از مطالعات مروری موجود که تنها بر یکی از این دو مفهوم تمرکز دارند، در این نوشتار سعی شده تا ارتباط میان انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری و نیز نقش PSO در هر دو حوزه تحلیل گردد.

۱-۱-دامنه‌ی مرور و خوشه‌بندی منابع

بدنه منابع این مقاله از مجموعه مقالات ارائه‌شده در زیر تشکیل شده است و شامل:

- **مرورها و چارچوب‌های مفهومی / شاخص‌های تاب‌آوری**: [۲]، [۴]، [۱۸]، [۱۹]، [۲۰]، [۲۷]، [۳۳]
- **بهره‌برداری / برنامه‌ریزی تاب‌آور و مقاوم (تکمیلی)**: [۳]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۶]، [۱۷]، [۲۲]، [۲۵]، [۲۶]، [۲۸]
- **انعطاف‌پذیری عملیاتی (پایه مفهومی و کاربردی)**: [۱]، [۷]، [۱۴]، [۱۵]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]
- **کاربردهای PSO در ریز شبکه، بازیابی، زمان‌بندی و ت صمیم‌های عملیاتی**: [۵]، [۶]، [۸]، [۹]، [۱۳]، [۲۱]، [۲۳]، [۲۴]، [۳۲]، [۳۴]، [۳۵]، [۳۶]، [۳۷]، [۳۸]، [۳۹]، [۴۰]
- **مقالات تکمیلی مورد استفاده در متن مرور**: [۳۴]، [۳۵]، [۳۶]، [۳۷]، [۳۸]، [۳۹]، [۴۰]
- **منابع کتابی برای بنیان کنترل و بهینه‌سازی**: [۴۱]، [۴۲]

در مرجع [۱]، یک چارچوب مبتنی بر PSOترکیبی برای تدارک صریح منابع انعطاف‌پذیری در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از خدمات انعطاف، به‌ویژه در محیط‌های دارای محدودیت عملیاتی، می‌تواند نقش مؤثری در بهبود بهره‌برداری و کاهش نقض قیود شبکه ایفا کند.

مرجع [۲] یک مرور جامع و نظام‌مند بر مفاهیم تاب‌آوری سیستم قدرت ارائه داده و ضمن بررسی تعاریف، شاخص‌ها و رویکردهای ارزیابی، به نقش روش‌های بهینه‌سازی و مدل‌سازی عدم‌قطعیت در ارتقای تاب‌آوری اشاره می‌کند. این مقاله به‌عنوان یکی از

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

منابع پایه مفهومی در این حوزه شناخته می‌شود. در مرجع [۳]، مسئله اندازه‌گذاری و بهره‌برداری تاب‌آور ریزشبکه‌های مستقل تحت عدم‌قطعیت بررسی شده و عملکرد چند الگوریتم فرا ابتکاری، از جملهPSO ، از منظر کارایی و پایداری مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این مطالعه بر برتری رویکردهای مبتنی بر فراابتکاری در مسائل پیچیده ریزشبکه دلالت دارد. مرجع [۴] با تمرکز بر تحلیل کمی تاب‌آوری، چارچوبی برای استانداردسازی شاخص‌ها و طبقه‌بندی رویکردهای تاب‌آوری ارائه می‌دهد و به چالش‌های موجود در ارزیابی یکپارچه تاب‌آوری سیستم‌های قدرت می‌پردازد.

در مرجع [۵]، یک مدل احتمالاتی بازآرایی شبکه توزیع با حضور منابع بادی و خورشیدی ارائه شده است که هدف آن کاهش انرژی تأمین‌نشده و افزایش قابلیت اطمینان شبکه با استفاده از PSO اصلاح‌شده است. مرجع [۶] یک روش زمان‌بندی احتمالاتی ریزشبکه را معرفی می‌کند که در آن، انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری شبکه به‌طور هم‌زمان و با استفاده از PSO خودتنظیم بهبود داده می‌شوند. این مطالعه بر اهمیت ترکیب این دو مفهوم در بهره‌برداری شبکه تأکید دارد.

در مرجع [۷]، زمان‌بندی انعطاف‌پذیر سیستم قدرت با درنظرگرفتن منابع تجدیدپذیر و خودروهای برقی بررسی شده و نشان داده شده است که PSO می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت عدم‌قطعیت و افزایش انعطاف سیستم ایفا کند. مرجع [۸] به بهره‌برداری بهینه ریزشبکه با لحاظ پاسخگویی بار پرداخته و از PSO برای بهبود عملکرد اقتصادی و عملیاتی سیستم استفاده کرده است. در مرجع [۹]، یک الگوریتم PSO اصلاح‌شده برای بهینه‌سازی رفاه اجتماعی در شبکه‌های هوشمند معرفی شده که در آن، قیود مربوط به تولید پراکنده و پاسخگویی بار لحاظ شده‌اند.

مطالعه [۱۰] بهره‌برداری چندهدفه ریزشبکه‌های دارای منابع تجدیدپذیر را با استفاده از PSO بررسی کرده و بهبود شاخص‌های عملیاتی را گزارش می‌دهد. مرجع [۱۱] به پیاده‌سازی عملی سیستم مدیریت انرژی ریزشبکه پرداخته و نقش الگوریتم‌های فراابتکاری در تصمیم‌گیری‌های تاب‌آور را در یک محیط واقعی نشان می‌دهد. در مرجع [۱۲]، یک چارچوب بهره‌برداری تاب‌آور برای ریزشبکه‌ها تحت عدم‌قطعیت ارائه شده که قیود امنیتی و عملیاتی شبکه را به‌صورت صریح در نظر می‌گیرد.

مرجع [۱۳] استفاده از PSO تطبیقی را برای بهبود عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک بررسی کرده و تأثیر آن را بر پایداری و بهره‌برداری مطمئن سیستم نشان می‌دهد.

در مرجع [۱۴]، افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع از طریق جایابی بهینه منابع تولید پراکنده مورد مطالعه قرار گرفته است.

مطالعه [۱۵] به زمان‌بندی هم‌زمان تولید پراکنده و پارکینگ خودروهای برقی پرداخته و نقش آن را در افزایش انعطاف‌پذیری سمت تقاضا نشان می‌دهد.

در مرجع [۱۶]، یک سیستم توزیع تاب‌آور مبتنی بر ریزشبکه‌ها و تولید پراکنده پیشنهاد شده که قابلیت بازیابی شبکه را در شرایط بحرانی بهبود می‌دهد. مرجع [۱۷] به بررسی روش‌های ارزیابی و بهبود تاب‌آوری در سیستم‌های چندانرژی سایبر–فیزیکی می‌پردازد و بر ضرورت رویکردهای یکپارچه تأکید دارد. در مراجع [۱۸] و [۱۹]، ارزیابی تاب‌آوری سیستم قدرت با درنظرگرفتن زیرساخت‌های حیاتی و همچنین مرور رویکردهای ارتقای تاب‌آوری ارائه شده است. مرجع [۲۰] مفاهیم، تعاریف و طبقه‌بندی‌های مرتبط با تاب‌آوری شبکه‌های توزیع را به‌صورت جامع مرور می‌کند.

در مرجع [۲۱]، یک روش سریع مبتنی بر PSO برای بازیابی بار بحرانی در ریزشبکه‌ها ارائه شده است. مرجع [۲۲] بهره‌برداری تاب‌آور سیستم‌های چندانرژی مبتنی بر منابع تجدیدپذیر را با رویکرد مقاوم بررسی می‌کند. مطالعه [۲۳] تنظیم فرکانس و ولتاژ ریزشبکه‌ها را با استفاده از PSO بررسی کرده و نقش آن را در حفظ پایداری سیستم نشان می‌دهد. در مرجع [۲۴]، هماهنگی پاسخگویی بار و تولید پراکنده به‌عنوان ابزاری برای افزایش تاب‌آوری شبکه مورد بررسی قرار گرفته است.

مراجع [۲۵] و [۲۶] به بهره‌برداری تاب‌آور شبکه‌های توزیع فعال و قیود تاب‌آوری در چارچوب بهینه‌سازی پرداخته‌اند. مرجع [۲۷] یک مرور جامع بر تاب‌آوری پیش‌دستانه سیستم‌های قدرت در برابر بلایای طبیعی ارائه می‌دهد. در مرجع [۲۸]، بهره‌برداری تاب‌آور ریزشبکه‌های چندانرژی با استفاده از مدل‌های تصادفی بررسی شده است.

مطالعه [۲۹] به زمان‌بندی پاسخگویی بار مسکونی با استفاده از PSO می‌پردازد. مرجع [۳۰] بهره‌برداری بهینه شبکه‌های توزیع فعال با حضور پاسخگویی بار را بررسی می‌کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

مرجع [۳۱] به مدل‌سازی و پیش‌بینی بار الکتریکی پرداخته که به‌عنوان زیرساخت تصمیم‌گیری در مطالعات تاب‌آوری کاربرد دارد. در مرجع [۳۲]، جنبه‌های پایداری و کنترل معماری‌های ریزشبکه به‌صورت جامع مرور شده است.
مرجع [۳۳] یک چارچوب مفهومی یکپارچه برای تعریف، ارزیابی و بهبود تاب‌آوری سیستم‌های قدرت ارائه می‌دهد.
در نهایت، مراجع [۳۴] تا [۴۰] کاربردهای پیشرفته PSO را در بازیابی فرکانس و ولتاژ، کنترل تاب‌آور، زمان‌بندی انعطاف‌پذیر، مدیریت سمت تقاضا و تشخیص جزیره‌ای شدن شبکه‌ها نشان می‌دهند که بیانگر گسترش دامنه کاربرد PSO در مسائل نوظهور تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری سیستم‌های قدرت است.
این مرور نشان می‌دهد که اگرچه PSO به‌طور گسترده در مسائل بهره‌برداری، زمان‌بندی و کنترل سیستم‌های قدرت به‌کار گرفته شده است، اما هنوز فقدان یک چارچوب یکپارچه که انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری را به‌صورت هم‌زمان و استاندارد مدل‌سازی کند، به‌وضوح احساس می‌شود؛ موضوعی که مبنای شناسایی شکاف‌های پژوهشی و ارائه مسیرهای آینده در ادامه مقاله خواهد بود.

۲- مفاهیم پایه انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت

۲-۱- مفهوم انعطاف‌پذیری سیستم قدرت

انعطاف‌پذیری سیستم قدرت به توانایی آن سیستم در پاسخ‌گویی مؤثر به تغییرات سیستم اعم از قابل‌پیش‌بینی و غیرقابل‌پیش‌بینی در شرایط مختلف بهره‌برداری اشاره دارد[۱]، [۶]، [۹]. این تغییرات می‌توانند ناشی از نوسانات بار، تغییرات تولید منابع تجدیدپذیر یا رفتار کاربران خودروهای برقی باشند. منابع انعطاف‌پذیری شامل پاسخگویی بار، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، تولید پراکنده و قابلیت بازآرایی شبکه هستند[۷]، [۱۲]، [۲۲].

در بسیاری از مطالعات مرتبط برای بیان کمی مفهوم انعطاف‌پذیری از شاخص‌هایی استفاده می‌شود که سرعت و دامنه تغییرات توان قابل دستیابی سیستم را نشان می‌دهند. به‌صورت مفهومی، انعطاف‌پذیری را می‌توان با رابطه زیر نمایش داد:

$$F = \frac{\Delta P_{max}}{\Delta t} \quad (۱)$$

که در آن $\Delta P_{\max}$ بیشینه تغییرات توان قابل اعمال و Δt بازه زمانی اعمال این تغییرات را نشان می دهد. مقادیر بزرگ‌تر F بیانگر توان بالاتر سیستم در انطباق با تغییرات بهره‌برداری می‌باشد.

۲-۲- مفهوم تاب‌آوری سیستم قدرت

تاب‌آوری سیستم قدرت به توانایی سیستم در مقاومت برابر اختلالات شدید، جذب شوک ها و بازیابی سریع پس از وقوع بحران‌ها دلالت می نماید و مفهومی فراتر از انعطاف‌پذیری در خود دارد . با مروری بر حوزه تاب‌آوری نمایان می شود که تاب‌آوری صرفاً «کم بودن خاموشی» نیست، بلکه به چرخه پیش از رویداد، حین رویداد، و پس از رویداد و همچنین توانایی سیستم در حفظ سطح خدمت و بازیابی سریع اشاره دارد [۲۰]، [۱۵]، [۲]. در شبکه توزیع نیز برای مفهوم تاب آوری تعاریف، طبقه‌بندی‌ها و نیازهای پژوهشی ویژه‌ای وجود دارد [۱۶]. برخلاف انعطاف‌پذیری که عمدتاً به شرایط بهره‌برداری عادی مرتبط است، تاب‌آوری بر رفتار سیستم در شرایط بحرانی و نیز پس از وقوع اختلالات کم‌احتمال اما پرخسارت دلالت دارد.
یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای کمی‌سازی تاب‌آوری، استفاده از منحنی عملکرد—زمان است. در این رویکرد، تاب‌آوری به‌صورت مساحت زیر منحنی عملکرد سیستم در بازه زمانی وقوع اختلال تا بازیابی تعریف می‌شود:

$$R = \int_{t_0}^{t_r} P(t)dt \quad (۲)$$

که در آن $P(t)$ سطح عملکرد سیستم در زمان t، t_0 زمان وقوع اختلال و t_r زمان بازیابی سیستم تا سطح قابل‌قبول عملکرد است. هرچه مقدار R بزرگ‌تر باشد، تاب‌آوری سیستم بالاتر ارزیابی می‌شود.

۲-۳- تمایز مفهومی انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

برای درک بهتر تفاوت میان انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری، شکل (۱) یک نمایش مفهومی از تغییرات سطح عملکرد سیستم قدرت در طول زمان ارائه می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، انعطاف‌پذیری عمدتاً به رفتار سیستم پیش از وقوع اختلالات شدید و در مواجهه با تغییرات بهره‌برداری عادی مربوط می‌شود، در حالی که تاب‌آوری بیانگر میزان افت عملکرد و سرعت بازیابی سیستم پس از وقوع اختلال است.

مطابق نمایش مفهومی ارائه‌شده در شکل (۱)، شاخص تاب‌آوری سیستم را می‌توان به‌صورت مساحت زیر منحنی عملکرد–زمان تعریف کرد که این مفهوم به‌طور خلاصه در رابطه (۲) بیان شده است. از دیگرسو ، قسمت پیش از اختلال در این شکل، با شاخص انعطاف‌پذیری ارائه‌شده در رابطه (۱) قابل تفسیر است.

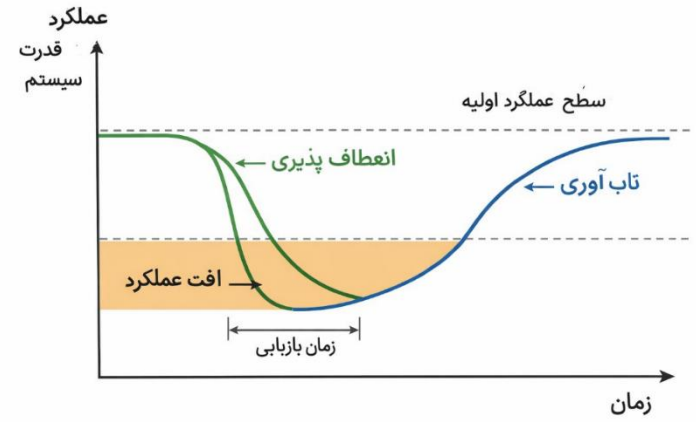
قابلیت اطمینان کلاسیک بیشتر به رخدادهای متعارف و شاخص‌های بلندمدت می‌پردازد. اما تاب‌آوری روی رخدادهای حدی و مسیر افت تا بازیابی متمرکز است [۲۰], [۴۱]. از دیگر سو، پایداری و کنترل پیش‌نیاز خدمت‌رسانی در وضعیت‌های بحرانی است، به‌خصوص در حالت جزیره‌ای ریزشبکه که بازیابی فرکانس - ولتاژ معنا پیدا می‌کند [۲۲], [۳۱], [۴۰].

۴-۲- چالش ناهمگونی تعریف و استانداردسازی

در مرور مطالب تاب‌آوری، دو مشکل ریشه‌ای وجود دارد :ناهماهنگی در تعریف و ناهماهنگی در شاخص ها ؛ نتیجه آن است که دو مقاله ممکن است هر دو ادعای «بهبود تاب‌آوری» کنند اما عملاً چیزهای متفاوتی را اندازه‌گیری کرده باشند [۲], [۲۶], [۳۷]. این نکته برای پژوهش‌های-PSO محور حیاتی است، چون «آنچه بهینه می‌شود» باید واقعاً نماینده تاب‌آوری/انعطاف‌پذیری باشد، نه صرفاً کاهش تلفات یا کاهش هزینه کوتاه‌مدت.

۳- معرفی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization – PSO) از جمله الگوریتم‌های فرا ابتکاری مبتنی بر هوش جمعی است که برای نخستین‌بار با الهام از رفتار اجتماعی پرندگان و ماهیان ارائه شد. در این الگوریتم، مجموعه‌ای از ذرات در فضای جست‌وجو حرکت می‌کنند و هر ذره نماینده یک پاسخ کاندید برای مسأله بهینه‌سازی است. فرآیند جست‌وجو بر اساس تبادل اطلاعات میان ذرات و بهره‌گیری هم‌زمان از تجربه فردی و جمعی شکل می‌گیرد. در مقایسه با بسیاری از روش‌های کلاسیک، PSO به تنظیم پارامترهای محدودتری نیاز دارد و به مشتق‌پذیری تابع هدف وابسته نیست. این ویژگی‌ها، PSO را به گزینه‌ای مناسب برای حل مسائل غیرخطی، غیرمحدب و چندهدفه در سیستم‌های قدرت تبدیل کرده است؛ مسائلی که معمولاً همراه با قیود پیچیده و عدم‌قطعیت‌های ساختاری همراه هستند[۵], [۸], [۱۰].



شکل(۱): نمایش مفهومی تفاوت بین انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت بر اساس تغییرات سطح عملکرد سیستم در طول زمان

Figure 1: Conceptional representation of difference between flexibility and resiliency in power systems based on the system operational variations over time

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

۳-۱- روابط پایه به‌روزرسانی در الگوریتمPSO

درPSO ، موقعیت و سرعت هر ذره در هر تکرار بر اساس روابط زیر به‌روزرسانی می‌شود:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1\left(pbest_i - x_i^k\right) + c_2r_2(gbest - x_i^k) \quad (۳)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (۴)$$

که در آن x_i^k و v_i^k به‌ترتیب موقعیت و سرعت ذره i در تکرار k هستند. عبارت $pbest_i$ بهترین موقعیتی است که ذره i تاکنون تجربه کرده و $gbest$ بهترین موقعیت به‌دست‌آمده در کل ازدحام ذرات را نشان می‌دهد. پارامتر w وزن لختی، و ضرایب c_1 و c_2ضرایب یادگیری شناختی و اجتماعی الگوریتم هستند. همچنین، r_1 و r_2 اعداد تصادفی یکنواخت در بازه صفر تا یک می‌باشند. [۴۲]

روابط (۳) و (۴) روابط اصلی الگوریتم PSO به حساب می آیند وشرایطی را فراهم می‌کنند که از طریق آن، میان جست‌وجوی سراسری و همگرایی موضعی تعادل برقرار شود. برای مسائل سیستم‌های قدرت که اغلب دارای چندین بهینه محلی هستند، این ویژگی مهمی به حساب می آید.

۳-۲- مزایا و محدودیت‌های PSO در کاربردهای سیستم قدرت

الگوریتم PSO به دلیل آنکه دارای ساختاری ساده و انعطاف‌پذیر می باشد، در طیف گسترده‌ای از مسائل سیستم‌های قدرت به‌کار گرفته می شود. از جمله مزایای اصلی این الگوریتم می‌توان به همگرایی نسبتاً سریع، قابلیت پیاده‌سازی آسان و توانایی حل مسائل پیچیده اشاره کرد[۱], [۵], [۹]. با این حال، PSO کلاسیک معمولا با محدودیت‌هایی از قبیل همگرایی زودهنگام و کاهش تنوع جمعیت در مراحل پایانی جست‌وجو مواجه می شود. این مشکل میتواند در مسائل پیچیده سیستم‌های قدرت که فضای جست‌وجوی گسترده و ناهموار دارند، گاها" منجر به افت کیفیت پاسخ بهینه شود، در مسائل قدرت، غیرخطی‌بودن، قیود عملیاتی و وجود چندهدف (هزینه، تلفات، شاخص تاب‌آوری، آلایندگی، پایداری) باعث می‌شود حل‌گرهای کلاسیک در برخی سناریوها دشوار شوند و PSO به‌عنوان جایگزین/تکمیل، جذاب باشد [۶], [۹], [۱۳], [۲۵]. با این حال، باید صادقانه گفت که PSOبهینه‌بودن جهانی را تضمین نمی‌کند و کیفیت پاسخ به تنظیم پارامترها و طراحی نمایش (encoding) وابسته است؛ به همین دلیل بسیاری از کارها نسخه‌های اصلاح‌شده یا ترکیبی ارائه کرده‌اند [۶], [۹], [۲۴], [۳۵], [۳۹].

۳-۴- جایگاه PSO در مسائل انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری

مطابق آنچه در **شکل ۲** ارائه شد، در هر دو حوزه انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت میتوان از الگوریتم PSO به‌عنوان ابزار اصلی بهینه‌سازی مورد استفاده کرد. در حوزه انعطاف‌پذیری، PSO عمدتاً برای مدیریت منابع قابل‌کنترل در شرایط بهره‌برداری عادی به‌کار می‌رود، در حالی که در حوزه تاب‌آوری، این الگوریتم نقش مهمی در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با بازیابی سیستم و کنترل پس از اختلال ایفا می‌کند. به نظر می رسد، ساختار جمعیتی PSO و قابلیت انطباق خوب آن با شرایط متغیر، این الگوریتم را به عنوان گزینه‌ای مناسب برای حل مسائل چندلایه و زمان‌مند در سیستم‌های قدرت در نظر گرفت. این ویژگی‌ها در بخش‌های بعدی مقاله، از طریق مرور کاربردهای PSO در افزایش انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری، به‌صورت تفصیلی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۵-ابعاد طبقه‌بندی

مطالعات پیشین PSO در تاب‌آوری/انعطاف‌پذیر،:

- **دامنه کاربرد :**توزیع، ریزشبکه، DR/EV، کنترل.
- **نوع تصمیم :**برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری/زمان‌بندی، بازیابی، طراحی کنترل.
- **نوع عدم‌قطعیت :**سناریو/مونت‌کارلو، روباست، قطعی.
- شاخص **ها /تابع هدف :**هزینه، ENS/EENS، بازیابی بار، شاخص‌های انعطاف‌پذیری، ترکیبی.
- **نوع PSO** :کلاسیک، دودویی، اصلاح‌شده/خودتنظیم، هیبرید.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

۴-مرور مطالعات پیشین بر اساس دسته‌بندی

۴-۱- برنامه‌ریزی و تدارک انعطاف (Flexibility Procurement & Planning)

یکی از مسیرهای مهم، واردکردن «انعطاف» به‌عنوان یک کالای قابل برنامه‌ریزی در طراحی شبکه است. درمرجع[۱]، PSO به‌عنوان حل‌گر برای تدارک صریح انعطاف در برنامه‌ریزی شبکه توزیع به‌کار رفته است. این رویکرد نشان می‌دهد انعطاف می‌تواند به‌صورت متغیر تصمیم در کنار سرمایه‌گذاری‌های سنتی (تقویت شبکه) قرار گیرد و به کاهش هزینه‌ها یا افزایش قابلیت میزبانی منابع متغیر کمک کند [۱].

در سطح بهره‌برداری سیستم، زمان‌بندی انعطاف‌پذیر با حضور تجدیدپذیر و EV در [۷] بررسی شده و از PSO اصلاح‌شده برای حل مسئله استفاده شده است؛ هدف کلان، بهبود شاخص‌های انعطاف سیستم در برابر تغییرات بار و تولید بوده است [۷]، [۳۶].

جمع‌بندی این دسته:

PSO در این حوزه بیشتر نقش حل‌گر برنامه‌ریزی/زمان‌بندی را دارد و نقطه قوت آن، سازگاری با مدل‌های غیرخطی و چندهدفه است. ضعف رایج، کمبود شاخص های استاندارد برای «مقدار انعطاف» و ارتباط آن با «تاب‌آوری» در رخدادهای حدی است؛ چیزی که مرورهای تاب‌آوری نیز آن را یک چالش عمومی می‌دانند [۷] ، [۳۳].

۴-۲- بهره‌برداری تاب‌آور ریزشبکه و شبکه‌های فعال تحت عدم قطعیت

بخش بزرگی از مطالعات پیشین بر تاب‌آوری در ریزشبکه‌ها و شبکه‌های توزیع فعال متمرکز است، زیرا ریزشبکه‌ها هم ابزار تاب‌آوری (جزیره‌ای‌شدن، تأمین بار بحرانی) هستند و هم خود در برابر عدم قطعیت‌ها آسیب‌پذیرند. در [۶] زمان‌بندی احتمالاتی ریزشبکه با هدف افزایش تاب‌آوری/انعطاف و با یک گونه خاص از PSO ارائه شده است [۶]. در [۳] نیز اندازه‌یابی/بهره‌برداری ریزشبکه‌های خارج از شبکه با رویکرد تاب‌آور و مقایسه فراابتکاری‌ها مطرح شده است [۳]. در سطح بهره‌برداری چندهدفه، [۱۰] و [۱۲] به بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه با حضور تجدیدپذیر پرداخته‌اند و [۲۲] یک نمونه معتبر از چارچوب مقاوم/تاب‌آور برای بهره‌برداری ریزشبکه ارائه می‌دهد [۱۰]، [۱۲]، [۲۲]. همچنین [۱۵] زمان‌بندی هم‌زمان DG و پارکینگ EV همراه با DR و عدم قطعیت را بررسی می‌کند که از نظر «انعطاف منابع سمت تقاضا و EV برای تاب‌آوری نیز اهمیت دارد. [۱۵] در حوزه چندحاملی/چندبرداری، [۲۱] و [۲۸] به بهره‌برداری سیستم‌های چندحاملی با درنظرگرفتن مؤلفه‌های تاب‌آوری یا راهبردهای تصادفی اشاره دارند [۲۱]، [۲۸]. چنین مطالعاتی نشان می‌دهند در آینده تاب‌آوری فقط مسئله برق نیست و به هم‌بستگی شبکه‌های انرژی (گاز/حرارت/برق) گره می‌خورد [۱۷]، [۲۸].

جمع‌بندی این دسته:

روند غالب: فرمول‌بندی بهینه‌سازی مقید با اهداف اقتصادی و تاب‌آوری (یا قیود تاب‌آوری) و حل توسط PSO یا فرا ابتکاری‌ها [۳]، [۶]، [۲۲]، [۲۵]، [۲۶].

- خلأ رایج: تعریف شاخص تاب‌آوری در مدل بهره‌برداری گاهی به «حداقل‌سازی بار قطع‌شده» تقلیل می‌یابد و سایر ابعاد (زمان بازیابی، کیفیت توان، پایداری دینامیکی) کم‌رنگ می‌شوند؛ در حالی که مرورهای چارچوبی بر چندبعدی‌بودن تاب‌آوری تأکید دارند [۲]، [۴]، [۱۹]، [۳۳].
- نیاز: اتصال مدل‌های زمان‌بندی به مدل‌های کنترلی دینامیکی ریزشبکه برای اطمینان از امکان‌پذیری واقعی [۳۴]، [۴۱].
- در این دسته، PSO غالباً به‌عنوان حل‌گر مسئله‌ای مقید و چندهدفه عمل می‌کند و مزیتش انعطاف در مدل‌سازی و حل است؛ اما ضعف مشترک، ساده‌سازی شاخص های تاب‌آوری و فاصله از ملاحظات پایداری کنترل هنگام بازیابی است [۲]، [۱۹]، [۳۴]، [۴۱].

۴-۳- شاخص ها و مرورهای چارچوبی تاب‌آوری و نقش آن‌ها در طراحی مدل‌هایPSO

در مطالعات پیشین، مرورهای جامع تاب‌آوری نقش حیاتی دارند؛ مرجع [۲] یک مرور جامع تعریف ،ارزیابی ،بهبود تاب‌آوری ارائه می‌دهد، مرجع [۴] به استاندارد سازی و چالش‌های کمی‌سازی پرداخته، و [۱۹] مرور متمرکز بر روش‌های ارزیابی و تقویت

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

تاب‌آوری در سیستم قدرت ارائه می‌کند. همچنین چارچوب مفهومی تاب‌آوری و مسیر شاخص گذاری را تقویت می‌کند [۳۳]. از منظر منابعIEEE ، مرور مطالعات پیشین بلایای طبیعی و تاب‌آوری پیش‌دستانه در [۲۷] و نیز مرور کنترل/پایداری ریزشبکه در [۳۲] پشتوانه نظری مهمی برای مقاله مروری ایجاد می‌کنند [۲۷]، [۳۲]. علاوه بر این، مرور DSM مبتنی بر PSO در [۳۷] نشان می‌دهد PSO چگونه در مدیریت سمت تقاضا به بلوغ رسیده و چه فرصت‌هایی برای پیوند DSM با تاب‌آوری وجود دارد[۳۷].

در همین چارچوب، منبع [۳۵] هرچند مستقیم در سیستم قدرت نیست، اما از منظر «کنترل تاب‌آور مبتنی بر «RL+PSO یک نمونه روش‌شناختی برای الهام‌گیری در مدل‌های تاب‌آوری سایبری-فیزیکی است [۳۵]؛ پیوند این ایده با شبکه‌های انرژی سایبری-فیزیکی در [۱۷] قابل توجه است .

جمع‌بندی این دسته:

مسئله کلیدی این است که» PSO حل‌گر» است؛ اما کیفیت خروجی به‌شدت به «تعریف درست شاخص تاب‌آوری/انعطاف» و سازگاری آن با واقعیت‌های شبکه وابسته است. بدون شاخص های استاندارد و مبنای مقایسه مشترک، مقایسه علمیِ نتایج PSOبا سایر روش‌ها دشوار می‌شود [۲]، [۴]، [۱۹]، [۳۳]. این دسته نقش «راهنمای طراحی» برای مدل‌های PSO دارد و شکاف‌ها را به‌صورت بنیادی نمایان می‌کند.

۴-۴- بازیابی بار بحرانی، بازآرایی، و بهره‌برداری مقید به تاب‌آوری

در رخدادهای شدید، هدف اصلی، حفظ سرویس‌دهی به بارهای حیاتی و بازگردانی سریع شبکه است. در [۲۰] بازیابی سریع بار بحرانی در شبکه ریزشبکه با PSO گزارش شده است [۲۰]. در سطح شبکه توزیع، [۲۶] مفهوم بهره‌برداری مقید به تاب‌آوری را در شبکه توزیع مطرح می‌کند [۲۶] و [۱۶] نشان می‌دهد بهره‌برداری و طراحی توزیع با تکیه بر DG و ریزشبکه‌ها می‌تواند مسیر افزایش تاب‌آوری باشد [۱۶]. مباحث ارزیابی تاب‌آوری با لحاظ زیرساخت‌های حیاتی در [۱۸] برای ژورنال بسیار ارزشمند است؛ زیرا مسئله تاب‌آوری را از سطح شبکه برق به سطح زیرساختی و بین‌بخشی می‌برد [۱۸]. همچنین [۲۳] هماهنگی DR و DG را برای افزایش تاب‌آوری بررسی می‌کند [۲۳] و [۵] و [۲۵] نیز از منظر عملیات و رخدادهای حدی و روش‌های عملیاتی، مکمل هستند [۵]، [۲۵].

نتیجه :این دسته بیشترین اتصال را به «تاب‌آوری عملیاتی» دارد، اما موفقیت آن در عمل وابسته به مدل‌سازی دقیق محدودیت‌های کنترلی و دینامیکی و نیز شاخص های چندبعدی است [۴۱]، [۳۴]، [۲]، [۱۹].

۴-۵- EV و منابع انعطاف سمت تقاضا

یکی از پل‌های اصلی بین انعطاف و تاب‌آوری، مدیریت سمت تقاضا است. [۳۷] مرور کاربردهای PSO در DSM را ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد PSO در مسائل کاهش پیک، هزینه، و بهبود کارایی چگونه به‌کار گرفته شده است [۳۷]. در [۲۹] زمان‌بندی DRخانگی با PSO بررسی شده و [۲۴] ترکیب PSO با MILP در DSM ارائه می‌شود که نشان‌دهنده گرایش به **حل‌های ترکیبی دقیق–فراابتکاری** برای مسائل بزرگ است [۲۴]، [۲۹]. از منظرEV ، [7]و [۱۵] نشان می‌دهندEV ها می‌توانند هم منبع انعطاف باشند و هم منبع عدم قطعیت؛ لذا طراحی زمان‌بندی باید هم‌زمان «اقتصادی + قیود شبکه‌ای + شاخص‌های انعطاف» را لحاظ کند [۷]، [۱۵]، [۳۶]. منبع [۳۹] نیز (کنفرانسی) ایده ترکیب PSO با پیش‌بینی بار مبتنی بر ANN برای DRرا ارائه می‌کند که از نظر ادغام داده‌محور (پیش‌بینی) و بهینه‌سازی، مسیر مهمی برای آینده تاب‌آوری عملیاتی است [۳۹]. در کنار این‌ها، [۳۰] (پیش‌بینی بار) نقش زیرساخت داده و پیش‌بینی را برای تصمیم‌گیری‌های DR/DSM و عملیات تاب‌آور برجسته می‌کند.

نتیجه: سمت تقاضا و EV می‌تواند هم منبع انعطاف (کمک به تداوم سرویس) و هم منبع عدم قطعیت (ریسک بهره‌برداری) باشد؛ لذا چارچوب‌های دقیق سناریو/عدم قطعیت و شاخص تاب‌آوری نیازمند تقویت است [۲]، [۱۹].

۴-۶- کنترل ریزشبکه، بازیابی فرکانس ولتاژ و جزیره‌ای‌شدن

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

در عمل، تاب‌آوری ریزشبکه‌ها به‌شدت به کنترل و کیفیت توان وابسته است. [۳۴] به‌صورت مستقیم PSO را برای تنظیم پارامترهای بازیابی فرکانس و ولتاژ در کنترل droop ریزشبکه جزیره‌ای به‌کار می‌گیرد [۳۴] که برای بخش کنترل تاب‌آور بسیار کلیدی است. همچنین [۱۳] کاربرد PSO در بهبود عملکرد سیستم PV را نشان می‌دهد [۱۳] و [۳۲] از دیدگاه مرور پایداری و کنترل معماری ریزشبکه‌ها یک پشتوانه نظری ارائه می‌کند. در حوزه تاب‌آوری توزیع و جایگذاریDG ،[۱۴] بهبود تاب‌آوری با جایگذاری بهینه DG را مطرح می‌کند. در موضوع جزیره‌ای‌شدن و جلوگیری/تشخیص آن، [۳۸] و [۴۰] مسیر کاربردی PSO را در شبکه‌های دارای منابع تجدیدپذیر و هیبرید ارائه می‌دهند [۳۸]، [۴۰]. همچنین [۸] و [۱۱] هرچند تمرکز اصلی آن‌ها ممکن است PSO نباشد، اما در فهم ساختار مسائل بهره‌برداری/کنترل ریزشبکه و پیوند آن با بهینه‌سازی نقش کمکی دارند [۸]، [۱۱]. نهایتاً، سازگاری همه این تصمیم‌ها با مبانی پایداری/کنترل سیستم قدرت یک الزام علمی است[۴۰].

نتیجه :شکاف اصلی اینجاست که بسیاری از مدل‌های بهینه‌سازی تاب‌آوری، پایداری و دینامیک را یا ساده‌سازی می‌کنند یا به‌طور کامل وارد مدل نمی‌کنند؛ در حالی‌که کنترل droop و بازیابی فرکانس/ولتاژ در واقعیت تعیین‌کننده است [۳۴]، [۴۰].

۵- روندهای کلان و جمع‌بندی روش‌شناختی

از منظر روندها، پنج جهت‌گیری مشخص دیده می‌شود:

۵-۱-چرخش از مسائل صرفاً اقتصادی به مسائل اقتصادی + تاب‌آوری/انعطاف[۱]، [۶]، [۲۰]، [۲۶].

در مطالعات اولیه، تمرکز اصلی بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت عمدتاً بر حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری یا افزایش سود اقتصادی معطوف بود. با این حال، مرور منابع نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، این رویکرد به‌تدریج جای خود را به مدل‌های چندهدفه داده است که در آن‌ها شاخص‌های تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری در کنار معیارهای اقتصادی لحاظ می‌شوند. مطالعاتی نظیر [۱] و [۶] نشان می‌دهند که تصمیم‌های بهینه اقتصادی در غیاب ملاحظات تاب‌آوری، می‌توانند در شرایط بحران منجر به عملکرد شکننده سیستم شوند. همچنین در [۲۰] و [۲۶] تأکید شده است که ارزیابی عملکرد سیستم تنها بر اساس هزینه، تصویر کاملی از قابلیت اطمینان و توان بازیابی شبکه ارائه نمی‌دهد. این تغییر جهت بیانگر بلوغ تدریجی مطالعات پیشین و حرکت به‌سوی مدل‌های تصمیم‌گیری واقع‌گرایانه‌تر است که عملکرد سیستم را در شرایط نرمال و بحرانی به‌صورت هم‌زمان در نظر می‌گیرند.

۵-۲-ترکیب روش‌ها برای افزایش مقیاس‌پذیری و دقتPSO+MILP [۲۴] ، PSO+ANN [۳۹] ، الگوی PSO+RL[۳۵]

یکی از روندهای روش‌شناختی برجسته در مطالعات پیشین ، حرکت از استفاده منفرد الگوریتم PSO به سمت چارچوب‌های ترکیبی است. در این مطالعات، PSOمعمولاً برای جست‌وجوی فضای جواب یا تنظیم پارامترها به‌کار می‌رود، در حالی که روش‌های مکمل نظیرMILP ، شبکه‌های عصبی یا یادگیری تقویتی وظیفه مدل‌سازی قیود، پیش‌بینی یا یادگیری رفتار سیستم را بر عهده دارند. به‌عنوان مثال، در [۲۴] ترکیب PSO با MILP به‌منظور افزایش دقت حل و مدیریت قیود پیچیده انجام شده است، در حالی که در [۳۹] از ANN برای پیش‌بینی بار و از PSO برای تصمیم‌گیری بهره‌برداری استفاده شده است. همچنین در [۳۵]، تلفیق PSO با یادگیری تقویتی نشان‌دهنده گرایش جدید به سمت چارچوب‌های هوشمند تطبیقی است. این روند نشان می‌دهد که PSO به‌تنهایی پاسخ‌گوی تمام نیازهای مسائل بزرگ‌مقیاس و دینامیک نبوده و ترکیب آن با روش‌های دیگر به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش مقیاس‌پذیری و قابلیت پیاده‌سازی مطرح شده است

۵-۳-پررنگ‌شدن DR/EV به‌عنوان ستون انعطاف و ابزار تاب‌آوری[۷]،[۱۵]، [۲۳]، [۲۹]، [۳۶].

مرور منابع نشان می‌دهد که پاسخگویی بار (DR) و خودروهای برقی (EV) از نقش‌های سنتی خود فراتر رفته و به‌عنوان منابع کلیدی انعطاف‌پذیری و حتی ابزارهای مؤثر افزایش تاب‌آوری مطرح شده‌اند. در مطالعاتی نظیر [۷] و[۱۵] DR و EVبه‌عنوان منابع انعطاف‌پذیر برای مدیریت عدم‌قطعیت تولید تجدیدپذیر استفاده شده‌اند، در حالی که در [۲۳] و [۲۹] نقش آن‌ها در پشتیبانی از بازیابی سیستم و حفظ پایداری در شرایط اختلال مورد توجه قرار گرفته است. مطالعه [۳۶] نیز نشان می‌دهد که

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

EVها می‌توانند به‌عنوان منابع فعال ذخیره‌سازی و تنظیم بار، نقش مهمی در افزایش توان تطبیق‌پذیری سیستم ایفا کنند. این روند بیانگر آن است که انعطاف‌پذیری سمت تقاضا به‌تدریج به یکی از ارکان اصلی طراحی سیستم‌های تاب‌آور تبدیل شده است.

۴-۵-گسترش به سامانه‌های چندانرژی/سایبری-فیزیکی[۱۷]، [۲۱]، [۲۸].

در سال‌های اخیر، دامنه مطالعات از شبکه‌های صرفاً الکتریکی به سمت سامانه‌های چندانرژی و سایبری–فیزیکی گسترش یافته است. در این رویکردها، تعامل میان زیرسیستم‌های برق، گاز، حرارت و همچنین لایه‌های کنترلی و ارتباطی مورد توجه قرار می‌گیرد. مطالعاتی مانند [۱۷] و [۲۸] نشان می‌دهند که تاب‌آوری سیستم قدرت به‌شدت تحت تأثیر وابستگی‌های متقابل میان حامل‌های انرژی و زیرساخت‌های سایبری است. همچنین در [۲۱]، نقش هماهنگی میان کنترل، ارتباطات و تصمیم‌های بهره‌برداری در فرآیند بازیابی سیستم برجسته شده است. با وجود این، مرور پژوهش های پیشین نشان می‌دهد که چارچوب‌های یکپارچه تصمیم‌گیری برای این سامانه‌های پیچیده هنوز در مراحل اولیه توسعه قرار دارند و نیازمند پژوهش‌های عمیق‌تر هستند

۵-۵-افزایش تعداد مرورها و تلاش برای استانداردسازی شاخص **ها و تعاریف** [۲]، [۳]، [۱۹]، [۲۷]، [۳۲]، [۳۳]، [۳۷].

افزایش قابل‌توجه تعداد مقالات مروری در سال‌های اخیر نشان‌دهنده بلوغ نسبی حوزه تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری سیستم‌های قدرت است. مطالعات مروری متعددی مانند [۲]، [۴]، [۱۹] و [۳۳] تلاش کرده‌اند تعاریف، شاخص‌ها و چارچوب‌های مفهومی تاب‌آوری را سامان‌دهی کنند. همچنین در [۲۷] و [۳۲] بر ضرورت استانداردسازی شاخص ها برای مقایسه نتایج مطالعات مختلف تأکید شده است. با این حال، تنوع و گاه ناهماهنگی تعاریف و شاخص‌ها در این مرورها نشان می‌دهد که هنوز اجماع کاملی در این زمینه شکل نگرفته است. از این منظر، افزایش مقالات مروری نه‌تنها نشانه بلوغ، بلکه بیانگر وجود شکاف‌های مفهومی و نیاز به چارچوب‌های جامع‌تر و قابل‌اجرا است.

۶-۵-جمع‌بندی روش‌شناختی

به‌طور کلی، این روندها نشان می‌دهند که مطالعات پیشین از مدل‌های ساده و تک‌هدفه به سمت چارچوب‌های چندهدفه، ترکیبی و واقع‌گرایانه حرکت کرده است. با این حال، نبود یک چارچوب یکپارچه که بتواند تاب‌آوری، انعطاف‌پذیری و الگوریتم‌های بهینه‌سازی نظیر PSO را به‌صورت هم‌زمان و مقیاس‌پذیر مدل کند، همچنان به‌عنوان یک خلأ اساسی در مطالعات پیشین باقی مانده است؛ خلأیی که می‌تواند مبنای توسعه پژوهش‌های آینده قرار گیرد.

۶-جمع‌بندی کاربردهای PSO در انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت

۱-۶-جمع‌بندی تحلیلی کاربردهای PSO در ارتقای انعطاف‌پذیری سیستم‌های قدرت

مرور و تحلیل مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در حوزه انعطاف‌پذیری سیستم‌های قدرت، عمدتاً در چارچوب مسائل بهره‌برداری و زمان‌بندی منابع قابل‌کنترل به‌کار گرفته شده است. در این مطالعات، PSO نقش کلیدی در هماهنگی منابعی نظیر تولید پراکنده، ذخیره‌سازهای انرژی، پاسخگویی بار و خودروهای برقی ایفا کرده و هدف اصلی آن کاهش نوسانات بهره‌برداری، بهبود تعادل میان تولید و مصرف و افزایش کارایی اقتصادی سیستم بوده است [۱]، [۶]، [۷]، [۱۵]، [۲۶]. تمرکز غالب این پژوهش‌ها بر شرایط بهره‌برداری عادی یا شبه‌عادی شبکه قرار داشته و انعطاف‌پذیری بیشتر به‌عنوان ابزاری برای مدیریت عدم‌قطعیت منابع تجدیدپذیر و تغییرات بار مورد توجه قرار گرفته است [۳]، [۱۲]، [۲۲]. با این حال، بررسی عمیق‌تر پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که در بخش قابل‌توجهی از این مطالعات، مفهوم انعطاف‌پذیری به‌صورت ضمنی و عمدتاً از طریق شاخص‌های اقتصادی نظیر هزینه بهره‌برداری یا کاهش انحرافات تولید–مصرف ارزیابی شده است [۱]، [۶]، [۲۶]. در نتیجه، تعریف صریح و مستقل از شاخص‌های انعطاف‌پذیری، مانند توانایی سیستم در پاسخ‌گویی سریع به تغییرات یا میزان منابع قابل مانور، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این رویکرد، اگرچه از منظر مسائل بهره‌برداری اقتصادی قابل قبول

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

است، اما تحلیل نقش انعطاف‌پذیری به‌عنوان یک ویژگی ساختاری و چندبعدی سیستم قدرت را محدود می‌سازد؛ موضوعی که در مرورهای مفهومی نیز به آن اشاره شده است [۲]، [۴]، [۱۹]، [۳۳].

۲-۶-جمع‌بندی تحلیلی کاربردهای PSO در ارتقای تاب‌آوری سیستم‌های قدرت

در حوزه تاب‌آوری سیستم‌های قدرت، مرور مطالعات نشان می‌دهد که الگوریتم PSO عمدتاً در سه محور اصلی مورد استفاده قرار گرفته است: بازیابی بارهای حیاتی پس از وقوع اختلال، بهره‌برداری تاب‌آور ریزشبکه‌ها در شرایط جزیره‌ای و کنترل سیستم در مراحل پس از اختلال [۲۰]، [۳۴]، [۳۸]، [۴۰]. در این چارچوب‌ها، PSOبه‌عنوان یک ابزار بهینه‌سازی برای تعیین راهبردهای بازیابی، اولویت‌بندی بارها و تنظیم منابع محلی به‌کار گرفته شده و نتایج گزارش‌شده عموماً حاکی از بهبود عملکرد سیستم در شرایط بحرانی است.

با وجود این، تحلیل تطبیقی مطالعات نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، تاب‌آوری به‌صورت غیرمستقیم و از طریق شاخص‌هایی نظیر میزان بار بازیابی‌شده یا کاهش هزینه اختلال ارزیابی شده است و شاخص‌های کمی و چندبعدی تاب‌آوری به‌طور مستقیم در تابع هدف یا فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ نشده‌اند [۲]، [۴]، [۱۹]، [۳۳]. افزون بر این، در بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌ها، ارتباط تصمیم‌های بهینه‌سازی با الزامات پایداری دینامیکی و کنترل پس از اختلال به‌صورت محدود بررسی شده است [۳۴]، [۴۱]. این موضوع موجب می‌شود که ارزیابی سطح واقعی تاب‌آوری سیستم و مقایسه منصفانه نتایج میان مطالعات مختلف با ابهام همراه باشد؛ چالشی که در مرورهای جامع حوزه تاب‌آوری نیز مورد تأکید قرار گرفته است [۲۷]، [۳۷]. در جدول(۱) جمع‌بندی تطبیقی کاربردهای الگوریتم PSO در انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت نشان داده شده است.

Table 1: Adaptive sum-up of PSO algorithm applications in power systems flexibility and resiliency

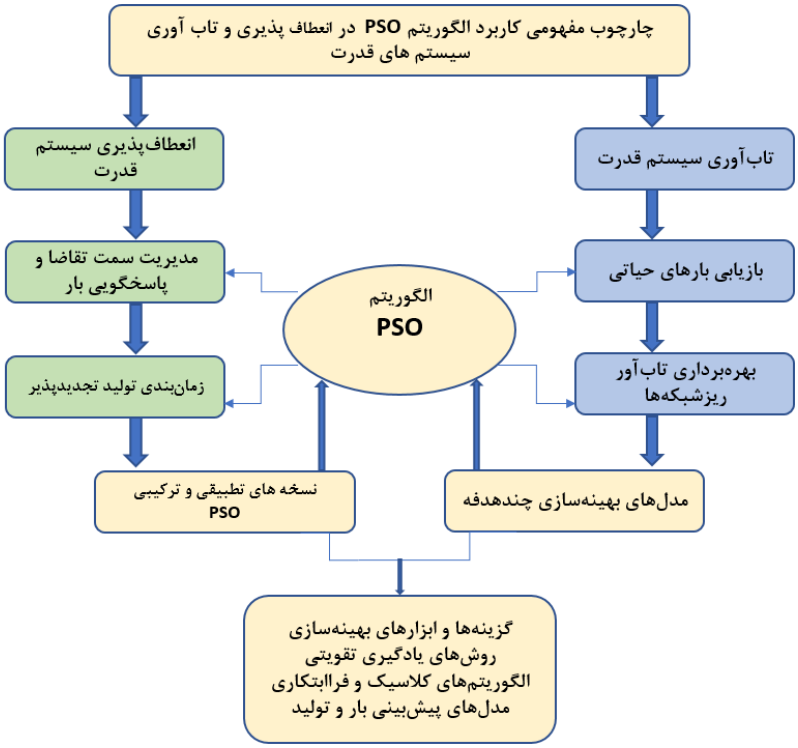
جدول (۱): جمع‌بندی تطبیقی کاربردهای الگوریتم PSO در انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت

محور مقایسه	انعطاف پذیری سیستم قدرت	تاب آوری سیستم قدرت
شرایط عملکرد	بهره‌برداری عادی یا شبه‌عادی شبکه	شرایط بحرانی و پس از وقوع اختلال
هدف غالب	کاهش هزینه، مدیریت نوسانات تولید–مصرف، افزایش مانورپذیری	کاهش زمان بازیابی، حفظ بارهای حیاتی، تداوم سرویس
نقشPSO	زمان‌بندی منابع، مدیریت پاسخگویی بار، هماهنگیDER	تعیین راهبرد بازیابی، اولویت‌بندی بار، کنترل پس از اختلال
سطح غالب شبکه	شبکه توزیع فعال، نیروگاه مجازی، مدیریت سمت تقاضا	ریزشبکه‌ها و شبکه‌های محلی
نوع شاخص‌ها	عمدتاً اقتصادی یا بهره‌برداری (ضمنی)	شاخص‌های بازیابی و بار بحرانی (اغلب ضمنی)
وضعیت مدل‌سازی	تمرکز بر حالت پایدار	تمرکز محدود بر دینامیک و گذرا
مراجع نمونه	[۱]، [۳]، [۶]، [۷]، [۱۲]، [۱۵]، [۲۲]، [۲۶]	[۲۰]، [۳۴]، [۳۸]، [۴۰]

۷-تحلیل تطبیقی مطالعات مبتنی برPSO

مرور و تحلیل تطبیقی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در هر دو حوزه انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است؛ با این حال، رویکردهای مدل‌سازی، اهداف بهینه‌سازی و شاخص‌های ارزیابی در این دو حوزه تفاوت‌های معناداری دارند. برای جمع‌بندی تحلیل تطبیقی ارائه‌شده و نمایش ارتباط مفهومی میان کاربردهای الگوریتم PSO در حوزه‌های مختلف سیستم قدرت، شکل ۲ ارائه شده است. شکل ۲ یک نمای مفهومی از حوزه‌های اصلی کاربرد الگوریتم PSO در سیستم‌های قدرت را نشان می‌دهد که در آن نقش این الگوریتم در پیوند مسائل مرتبط با انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم به‌صورت یکپارچه نمایش داده شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025



شکل(۲): چارچوب مفهومی کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در افزایش انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت.

Figure 2: Conceptional framework of PSO algorithm application to enhance power systems flexibility and resiliency

در مطالعات مرتبط با انعطاف‌پذیری، تمرکز اصلی بر بهینه‌سازی بهره‌برداری در شرایط عادی یا شبه‌عادی شبکه، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و مدیریت نوسانات تولید و مصرف بوده است [۱]، [۳]، [۶]، [۱۲]، [۲۲]، [۲۶]. در مقابل، مطالعات تاب‌آوری عمدتاً بر شرایط بحرانی و پس از وقوع اختلالات شدید تمرکز داشته و اهدافی نظیر کاهش زمان بازیابی، حفظ بارهای حیاتی و ارتقای عملکرد سیستم در شرایط پس از اختلال را دنبال کرده‌اند [۲۰]، [۳۴]، [۳۸]، [۴۰].

این تفاوت در تمرکز و اهداف موجب شده است که در بخش قابل‌توجهی از پیشینه پژوهش، انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرند و ارتباط ساختاری و مفهومی میان این دو مفهوم کمتر به‌صورت صریح مدل‌سازی شود .از منظر سطح شبکه نیز، بیشتر مطالعات انعطاف‌پذیری در بستر شبکه‌های توزیع فعال، نیروگاه‌های مجازی و مدیریت سمت تقاضا انجام شده‌اند [۱]، [۷]، [۱۵]، [۲۶]، در حالی که بخش عمده مطالعات تاب‌آوری بر ریزشبکه‌ها و شبکه‌های محلی متمرکز بوده‌اند [۲۰]، [۳۴]، [۳۸]. این الگو نشان‌دهنده نقش کلیدی ساختارهای غیرمتمرکز در ارتقای تاب‌آوری سیستم‌های قدرت است.

۱-۷-چارچوب تحلیلی یکپارچه انعطاف‌پذیری-تاب‌آوری

برخی مطالعات اخیر تلاش کرده‌اند تا انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری را به‌صورت هم‌زمان و در قالب یک مسأله بهینه‌سازی یکپارچه مورد توجه قرار دهند. به‌صورت مفهومی، این رویکرد را می‌توان با یک تابع هدف ترکیبی شامل مؤلفه‌های اقتصادی، زمانی و فنی نمایش داد، به‌گونه‌ای که هزینه بهره‌برداری سیستم، زمان بازیابی پس از اختلال و شاخص‌های کمی تاب‌آوری به‌طور هم‌زمان در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ شوند [۱]، [۲۰]، [۳۴]. در این چارچوب، ضرایب وزنی بیانگر اهمیت نسبی هر مؤلفه بوده و امکان ایجاد موازنه میان عملکرد اقتصادی و الزامات تاب‌آوری فراهم می‌شود. مطابق چارچوب مفهومی ارائه‌شده در این مقاله (شکل ۲)، الگوریتم PSO می‌تواند نقش مؤثری در حل این مسأله چندهدفه ایفا کند و با جست‌وجوی فضای تصمیم، راهکارهایی ارائه دهد که بهره‌برداری سیستم را هم در شرایط عادی و هم در شرایط بحرانی بهبود بخشند. چنین رویکردی با مبانی مطرح‌شده

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

در مرورهای مفهومی تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری سازگار بوده و گامی در جهت کاهش فاصله میان برنامه‌ریزی اقتصادی و بهره‌برداری تاب‌آور محسوب می‌شود [۲]، [۴]، [۱۹]، [۳۳]، [۴۱].

۷-۲-الگوی غالب توابع هدف در مطالعات-PSO محور

تحلیل منابع-PSO محور مرتبط با انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری نشان می‌دهد که توابع هدف مورد استفاده در این مطالعات عمدتاً ترکیبی از چند مؤلفه اصلی هستند. این مؤلفه‌ها شامل هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری، کمبود انرژی تأمین‌نشده (ENS/EENS)یا جریمه‌های قطع بار، شاخص‌های بازیابی و اولویت‌بندی بارهای بحرانی، و در برخی موارد شاخص‌های مرتبط با انعطاف‌پذیری نظیر قیود نرخ تغییر توان و محدودیت‌های ramp می‌باشند [۱]، [۶]، [۲۰]، [۲۶]. این الگو به‌ویژه در مطالعات مربوط به بازیابی شبکه و بهره‌برداری تاب‌آور ریزشبکه‌ها به‌وضوح قابل مشاهده است [۲۰]، [۳۴]، [۳۸]. با این حال، بررسی تطبیقی نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، شاخص‌های انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری به‌صورت ضمنی در قالب جریمه‌های اقتصادی مدل‌سازی شده‌اند و کمتر به‌عنوان متغیرهای مستقل و قابل تفسیر در تابع هدف ظاهر شده‌اند؛ موضوعی که در مرورهای مفهومی نیز به‌عنوان یک محدودیت اساسی مطرح شده است [۲]، [۱۹]، [۳۳].

۷-۳-کیفیت مدل‌سازی رخدادها و عدم‌قطعیت

یکی از چالش‌های جدی در پیشینه پژوهش، نحوه مدل‌سازی رخدادهای شدید و عدم‌قطعیت‌ها است. بررسی مطالعات نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، سناریوهای اختلال و عدم‌قطعیت به‌صورت ساده‌سازی‌شده یا با فرضیات محدود مدل‌سازی شده‌اند [۶]، [۱۲]، [۲۲]. در مقابل، مرورهای شاخص ها و تاب‌آوری به‌طور صریح بر ضرورت استفاده از مدل‌های مکانی–زمانی دقیق‌تر، سناریوسازی معنادار و حتی بهره‌گیری از ابزارهایی نظیر GIS و روش‌های کاهش سناریو تأکید کرده‌اند [۲]،[۴]،[۱۹]. همچنین برخی مرورها، نبود استانداردسازی در تعریف سناریوها و کمبود داده‌های معتبر و قابل بازتولید را به‌عنوان مانع اصلی در ارزیابی و مقایسه نتایج مطالعات گزارش کرده‌اند [۳۳]، [۳۷]. این چالش به‌طور مستقیم بر مطالعات-PSO محور اثرگذار است، زیرا کیفیت راهکارهای بهینه‌سازی به‌شدت به دقت مدل‌سازی رخدادها و عدم‌قطعیت‌ها وابسته است.

۷-۴-فاصله میان بهینه‌سازی ماندگار و اجرای عملی با قیود گذرا

در بخش قابل‌توجهی از راهبردهای بازیابی و تشکیل ریزشبکه، تمرکز اصلی بر قیود ماندگار و شرایط حالت پایدار بوده است. با این حال، مرور مطالعات مرتبط با شبکه‌های توزیع و ریزشبکه‌ها نشان می‌دهد که قیود گذرا نظیر پدیده‌های islanding transient، cold-load pickupو فرآیندهای blackstart کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳۲]، [۳۴]، [۴۱]. این موضوع از منظر عملیاتی اهمیت بالایی دارد، زیرا نادیده‌گرفتن قیود گذرا می‌تواند قابلیت اجرای راهکارهای بهینه‌سازی را در شرایط واقعی محدود سازد. در این چارچوب، اگرچه الگوریتم PSO قادر است راهکارهای عددی بهینه‌ای ارائه دهد، اما بدون لحاظ قیود گذرا و دینامیکی، این راهکارها لزوماً قابل اجرا در شبکه واقعی نخواهند بود. این فاصله میان بهینه‌سازی ماندگار و اجرای عملی یکی از چالش‌های اساسی مطالعات-PSO محور در حوزه تاب‌آوری محسوب می‌شود [۳۴]،[۴۱].

۷-۵-وابستگی‌های بین‌زیرساختی و ملاحظات رگولاتوری

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که تاب‌آوری شبکه‌های قدرت به‌شدت به عملکرد زیرساخت‌های دیگر نظیر سامانه‌های مخابراتی، زنجیره‌های لجستیکی تعمیرات و چارچوب‌های مدیریتی وابسته است. این نگاه بین‌زیرساختی در برخی مطالعات و مرورهای موجود به‌صورت صریح مطرح شده است [۱۷]، [۱۹]. علاوه بر این، در مرورهای مرتبط با شبکه‌های توزیع فعال، نقش عوامل رگولاتوری و مدل‌های کسب‌وکار به‌عنوان موانع یا تسهیل‌کننده‌های پیاده‌سازی راهبردهای تاب‌آور مورد تأکید قرار گرفته است [۲۶]،[۳۷]. از این منظر، توسعه چارچوب‌های-PSO محور برای تاب‌آوری، بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های نهادی و

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

رگولاتوری، با چالش‌های جدی در مرحله اجرا مواجه خواهد شد. این موضوع نشان می‌دهد که رویکردهای آینده باید فراتر از بهینه‌سازی فنی حرکت کرده و تعامل میان ابعاد فنی، نهادی و بین‌زیرساختی را نیز در نظر بگیرند.

۶-۷-جمع‌بندی این بخش

تحلیل تطبیقی ارائه‌شده در این فصل نشان می‌دهد که اگرچه الگوریتم PSO ابزار قدرتمندی برای حل مسائل پیچیده انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت است، اما اثربخشی آن به‌شدت به کیفیت مدل‌سازی، تعریف شاخص‌ها، لحاظ قیود دینامیکی و در نظر گرفتن واقعیت‌های اجرایی وابسته است. این یافته‌ها زمینه‌ساز شناسایی دقیق‌تر شکاف‌های پژوهشی و ارائه مسیرهای آینده در فصل بعدی مقاله خواهند بود. در جدول (۲) الگوهای غالب مدل‌سازی و توابع هدف در مطالعات PSO-محور مرتبط با انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری نشان داده شده اند.

Table 2: Dominant patterns of modeling and objective functions in PSO algorithm studies related to flexibility and resiliency

جدول (۲): الگوهای غالب مدل‌سازی و توابع هدف در مطالعات PSO-محور مرتبط با انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری

بعد تحلیلی	الگوی غالب در مطالعات PSO
نوع مسأله	بهینه‌سازی تک‌هدفه یا چندهدفه با وزن‌دهی
مؤلفه‌های تابع هدف	هزینه بهره‌برداری/سرمایه‌گذاری، ENS/EENS، جریمه قطع بار، اولویت بارهای بحرانی
لحاظ انعطاف‌پذیری	عمدتاً به‌صورت قیود یا جریمه اقتصادی (ضمنی)
لحاظ تاب‌آوری	اغلب از طریق بار بازیابی‌شده یا زمان بازیابی (غیر مستقیم)
مدل‌سازی عدم‌قطعیت	سناریومحور ساده یا فرضیات محدود
قیود دینامیکی و گذرا	در اکثر مطالعات نادیده گرفته شده یا بسیار ساده‌سازی شده
رویکردهای تکمیلی	ترکیب PSO باMILP ، ANNیا چارچوب‌های کنترلی
مراجع پشتیبان	[۱]، [۶]، [۲۰]، [۲۴]، [۲۶]، [۳۴]، [۳۷]،[۴۱]

۸- چالش‌ها و شکاف‌های پژوهشی

۸-۱- ناهمگونی در تعریف و شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری

با وجود رشد قابل توجه پژوهش‌ها در حوزه تاب‌آوری سیستم‌های قدرت، بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که هنوز اجماع عملیاتی روشنی بر تعریف و شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری وجود ندارد. بخش عمده‌ای از مطالعات، به‌ویژه در کاربردهای مبتنی بر بهینه‌سازی، تاب‌آوری را به شاخص‌هایی نظیر میزان بار قطع‌شده یا هزینه وقفه فروکاسته‌اند [۲]، [۴]، [۱۹]، [۳۳]. اگرچه این شاخص‌ها جنبه‌هایی از عملکرد سیستم را منعکس می‌کنند، اما قادر به نمایش کامل ابعاد زمانی، ساختاری و عملکردی تاب‌آوری نیستند. این ناهمگونی در انتخاب شاخص‌ها موجب می‌شود مقایسه نتایج مطالعات مختلف، به‌ویژه در ارزیابی روش‌های مبتنی بر PSO، با عدم قطعیت و ابهام همراه باشد. این وضعیت مانع استخراج نتیجه‌گیری‌های مهندسی و سیاستی قابل اتکا شده و ضرورت حرکت به سمت مجموعه‌ای هماهنگ و استاندارد از شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری را برجسته می‌سازد [۳۷].

۸-۲- کمبود مرجع‌های مقایسه بازتولیدپذیر و داده‌های رخدادهای شدید

یکی از چالش‌های اساسی در مطالعات تاب‌آوری، فقدان مرجع‌های مقایسه بازتولیدپذیر و داده‌های معتبر رخدادهای شدید است. بسیاری از پژوهش‌ها به سناریوهای فرضی یا داده‌های محدود متکی هستند که امکان بازتولید نتایج و مقایسه منصفانه روش‌ها را کاهش می‌دهد [۲]، [۱۹]، [۳۳]. این ضعف نه‌تنها در مطالعات مفهومی، بلکه حتی در پژوهش‌های بهره‌برداری و برنامه‌ریزی عملیاتی نیز مشاهده می‌شود [۶]، [۲۰]. اتکای بیش از حد به سناریوهای مصنوعی موجب تضعیف اعتبار بیرونی نتایج شده و قابلیت تعمیم آن‌ها به شبکه‌های واقعی را محدود می‌سازد. این مسئله نشان می‌دهد که توسعه مجموعه‌داده‌های اشتراکی و مرجع‌های مقایسه استاندارد برای رخدادهای شدید، یکی از نیازهای بنیادی پژوهش‌های آینده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

۸-۳- مقیاس‌پذیری و الزامات زمان واقعی در کاربرد PSO

اگرچه الگوریتم PSO به دلیل ساختار ساده و انعطاف‌پذیری بالا به‌طور گسترده در مسائل تاب‌آوری به‌کار گرفته شده است، اما چالش مقیاس‌پذیری و زمان محاسباتی همچنان پابرجاست. در مسائل بزرگ‌مقیاس شامل پخش بار مقید، بازآرایی شبکه یا برنامه‌های گسترده پاسخگویی بار، زمان همگرایی PSO می‌تواند مانع استفاده عملی و برخط از آن شود. ظهور چارچوب‌های ترکیبی نظیر PSO+MILP را می‌توان تلاشی برای غلبه بر این محدودیت‌ها دانست [۲۴]. با این حال، بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات زمان واقعی و پیاده‌سازی‌های عملیاتی همچنان محدود بوده و اغلب در سطح شبیه‌سازی باقی مانده‌اند [۳۴]، [۴۱].

۸-۴- فاصله میان بهینه‌سازی تاب‌آوری و پایداری و کنترل دینامیکی

بخش قابل توجهی از مطالعات مبتنی بر بهینه‌سازی، تصمیم‌های مربوط به بازیابی یا زمان‌بندی را در چارچوب‌های ایستا اتخاذ می‌کنند، بدون آنکه سازگاری این تصمیم‌ها با دینامیک سیستم و الزامات پایداری به‌صورت جامع بررسی شود. این در حالی است که تصمیم‌های ناهماهنگ با دینامیک فرکانس و ولتاژ می‌توانند در شرایط بحرانی به تشدید ناپایداری سیستم منجر شوند. از این منظر، هم‌راستایی تصمیم‌های بهینه‌سازی با مبانی کلاسیک کنترل [۴۱]، مطالعات پیشین کنترل ریزشبکه‌ها [۳۲] و حلقه‌های بازیابی فرکانس و ولتاژ [۳۴] امری حیاتی تلقی می‌شود.

۸-۵- تهدیدهای ترکیبی فیزیکی–سایبری در سیستم‌های قدرت مدرن

با گسترش شبکه‌های انرژی سایبری–فیزیکی و سامانه‌های چندانرژی، مفهوم تاب‌آوری ناگزیر باید فراتر از اختلالات صرفاً فیزیکی توسعه یابد و تهدیدهای سایبری را نیز در بر گیرد. اگرچه برخی مطالعات به این ضرورت اشاره کرده‌اند [۱۷]، مرور منابع نشان می‌دهد که مدل‌سازی صریح تهدیدهای سایبری و اثر آن‌ها بر بهره‌برداری سیستم قدرت هنوز بسیار محدود است. رویکردهای ترکیبی نظیر استفاده هم‌زمان از یادگیری تقویتی و PSO برای کنترل تاب‌آور [۳۵] می‌توانند مسیرهای نویدبخشی ارائه دهند، ، فقدان مدل‌های دقیق تهدید سایبری و سناریوهای حمله–دفاع مانع ارزیابی واقع‌گرایانه کارایی این روش‌ها در سیستم‌های قدرت می‌شود [۱۷]، [۱۹].

۸-۶- حساسیت الگوریتم PSO به تنظیم پارامترها و نبود پروتکل مقایسه منصفانه

یکی از چالش‌های بنیادین الگوریتم PSO، حساسیت نتایج به تنظیم پارامترهای الگوریتمی نظیر ضرایب شناختی و اجتماعی، وزن اینرسی و معیار توقف است. اگرچه نسخه‌های اصلاح‌شده و تطبیقی PSO برای کاهش این حساسیت پیشنهاد شده‌اند [۶]، [۹]، [۱۳]، اما نبود یک پروتکل مقایسه منصفانه موجب شده است که ادعای برتری روش‌ها به‌سادگی قابل ارزیابی نباشد. عدم استفاده از بذر تصادفی ثابت، تفاوت در معیارهای توقف و عدم انتشار کد از جمله عواملی هستند که شفافیت و قابلیت بازتولید نتایج را کاهش می‌دهند [۳۷].

۸-۸-جمع‌بندی این بخش

به‌طور کلی، چالش‌ها و شکاف‌های شناسایی‌شده نشان می‌دهند که مسئله اصلی حوزه، نه کمبود الگوریتم‌های بهینه‌سازی، بلکه کمبود چارچوب‌های ارزیابی استاندارد، داده‌های قابل بازتولید و پیوند منسجم میان بهینه‌سازی، کنترل و واقعیت‌های عملیاتی سیستم‌های قدرت است. پرداختن نظام‌مند به این چالش‌ها می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای کیفیت، قابلیت اتکا و اثرگذاری پژوهش‌های آینده ایفا کند.

۹- پیشنهادات و مسیرهای آینده

۹-۱-توسعه چارچوب یکپارچه «انعطاف–تاب‌آوری» با شاخص‌های چندبعدی

یکی از مسیرهای کلیدی پژوهش‌های آینده، طراحی یک چارچوب یکپارچه انعطاف–تاب‌آوری است که بتواند به‌صورت هم‌زمان شاخص‌های مربوط به سرویس‌دهی و بازیابی (نظیر بار بحرانی بازیابی‌شده و زمان بازگشت سیستم) و شاخص‌های فنی مرتبط با

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

کیفیت توان و پایداری دینامیکی را پوشش دهد. چنین چارچوبی می‌تواند پیوند روشنی میان برنامه‌ریزی مبتنی بر انعطاف [۱]، راهبردهای بازیابی بار بحرانی [۲۰] و کنترل ریزشبکه‌ها در شرایط جزیره‌ای و بحرانی [۳۴] برقرار سازد. استحکام این چارچوب مستلزم اتکا بر مرورهای شاخص محور موجود [۲]، [۴]، [۱۹]، [۳۳] و هم‌راستایی با مبانی کلاسیک کنترل و پایداری [۴۱] است.

۹-۲-توسعه PSO توزیع‌شده و چندعامله برای شبکه‌های فعال و ریزشبکه‌های متعامل

با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازها، خودروهای برقی و برنامه‌های پاسخگویی بار، تصمیم‌گیری متمرکز به‌تدریج با محدودیت‌های مقیاس‌پذیری و ارتباطی مواجه می‌شود. در این راستا، توسعه نسخه‌های PSO توزیع‌شده یا چندعامله به‌عنوان یک مسیر پژوهشی مهم مطرح است. چنین رویکردهایی می‌توانند هماهنگی میان منابع DG، ESS، EV و DR را در بازآرایی شبکه‌های توزیع و بهره‌برداری تاب‌آور تسهیل کنند [۱۶]، [۲۶]، [۱۵]، [۷]، [۲۸].

۹-۳- ادغام PSO با یادگیری تقویتی و مدل‌های داده‌محور برای تاب‌آوری زمان واقعی

مرور منابع نشان می‌دهد که ترکیب PSO با روش‌های داده‌محور و یادگیری، یکی از امیدوارکننده‌ترین مسیرهای آینده برای تصمیم‌گیری تاب‌آور در زمان واقعی است. الگوهای ترکیبی مانند RL+PSO [35] و ANN+PSO در مدیریت پاسخگویی بار [۳۹] نشان می‌دهند که مسیر آینده به سمت چارچوب‌هایی حرکت می‌کند که در آن‌ها سیاست‌گذاری تطبیقی، تنظیم پارامترهای بهینه‌سازی و پیش‌بینی رفتار سیستم به‌صورت یکپارچه انجام می‌شود. در این چارچوب، پیش‌بینی بار [۳۰] و مدیریت DSM/DR [۳۷] نقش زیرساختی ایفا می‌کنند.

۹-۴- ایجاد مرجع‌های مقایسه بازتولیدپذیر شامل شبکه‌ها، سناریوهای رخداد شدید و انتشار کد

یکی از مسیرهای پژوهشی سطح‌بالا و بسیار قابل چاپ، طراحی و ارائه یک مرجع مقایسه استاندارد و بازتولیدپذیر برای مطالعات PSO در حوزه تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری است. چنین مرجعی می‌تواند شامل مجموعه‌ای از شبکه‌های آزمون، سناریوهای رخداد شدید، شاخص‌های ارزیابی مشخص و انتشار کدهای محاسباتی باشد. این مسیر که بر ضرورت‌های مطرح‌شده در مرورهای مفهومی و شاخص های ارزیابی استوار است [۲]، [۱۹]، [۳۳]، [۳۷]، امکان مقایسه منصفانه روش‌ها و بازتولید نتایج را فراهم می‌کند.

۹-۵- ادغام تصمیم‌های اقتصادی و بازارمحور با تاب‌آوری فنی سیستم

یک مسیر پژوهشی قدرتمند دیگر، پیوند تصمیم‌های اقتصادی و بازار انعطاف با قیود فنی تاب‌آوری است. تبدیل انعطاف‌پذیری به یک متغیر تصمیم‌گیری در سطح برنامه‌ریزی و بازار [۱] و اتصال آن به قیود بهره‌برداری تاب‌آور [۲۶] و راهبردهای بازیابی بار بحرانی [۲۰] می‌تواند چارچوب‌های فنی–اقتصادی نوینی ایجاد کند. این رویکرد امکان بررسی هم‌زمان کارایی اقتصادی و قابلیت اطمینان سیستم را فراهم می نماید.

۹-۶-جمع‌بندی

به‌طور کلی، پیشنهادات ارائه‌شده نشان می‌دهند که مسیر آینده پژوهش‌ها باید از توسعه صرف الگوریتم‌ها فراتر رفته و به سمت چارچوب‌های یکپارچه، داده‌محور، مقیاس‌پذیر و قابل بازتولید حرکت کند. هر یک از محورهای مطرح‌شده، نه‌تنها به شکاف‌های شناسایی‌شده در فصل پیشین پاسخ می‌دهند، بلکه ظرفیت تبدیل شدن به پژوهش‌های مستقل و اثرگذار در پیشینه مطالعات تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری سیستم‌های قدرت را نیز دارا هستند.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مرور جامع و نظام‌مند بر کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و مشتقات آن در حوزه‌های انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت ارائه شد. این مرور با تکیه بر یک فهرست قفل‌شده شامل ۴۲ مرجع منتخب انجام شده و تلاش کرده است با پرهیز از پراکندگی مفهومی، تصویری منسجم از وضعیت موجود پژوهش‌ها ارائه دهد. نتایج نشان

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

می‌دهد که PSO به‌طور گسترده در طیفی از مسائل، از جمله برنامه‌ریزی مبتنی بر انعطاف‌پذیری [۱]، زمان‌بندی و بهره‌برداری ریزشبکه‌ها تحت عدم‌قطعیت [۳]، [۶]، [۱۲]، [۲۲]، تا توسعه شاخص‌ها و مرورهای چارچوبی تاب‌آوری [۲]، [۴]، [۱۹]، [۳۳]، [۲۷]، [۳۷] و نیز مسائل کنترلی نظیر جزیره‌ای‌شدن و بازیابی فرکانس و ولتاژ [۳۴]، [۳۸]، [۴۰] به‌کار گرفته شده است.

تحلیل تطبیقی مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه پیشرفت‌های قابل‌توجهی در توسعه روش‌ها و کاربردهای مبتنی بر PSO حاصل شده است، اما چالش‌ها و شکاف‌های بنیادی همچنان پابرجا هستند. از مهم‌ترین این چالش‌ها می‌توان به ناهمگونی در تعریف و شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری، فقدان مرجع‌های مقایسه بازتولیدپذیر و داده‌های معتبر رخدادهای شدید، محدودیت‌های مقیاس‌پذیری در مسائل بزرگ‌مقیاس و همچنین فاصله میان تصمیم‌های بهینه‌سازی و الزامات پایداری و کنترل دینامیکی اشاره کرد [۲]، [۴]، [۱۹]، [۳۳]، [۴۱]. تداوم این شکاف‌ها، مقایسه منصفانه روش‌ها و انتقال نتایج پژوهشی به کاربردهای عملی را با دشواری مواجه می‌سازد.

بر این اساس، مسیرهای پژوهشی آینده ارائه‌شده در این مقاله بر ضرورت حرکت به سمت چارچوب‌های یکپارچه، مقیاس‌پذیر و قابل بازتولید تأکید دارند؛ چارچوب‌هایی که بتوانند انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری را به‌صورت هم‌زمان مدل کرده و نقش الگوریتم PSO را از یک ابزار حل عددی صرف به یک مؤلفه ساختاری در فرآیند تصمیم‌گیری ارتقا دهند. این مسیرها نه‌تنها می‌توانند مبنای چند پژوهش مستقل در سطح دکتری قرار گیرند، بلکه زمینه‌ساز نگارش و انتشار مقالات مروری و پژوهشی با کیفیت بالا در ژورنال‌های معتبر فارسی خواهند بود. در مجموع، انتظار می‌رود نتایج این مرور بتواند به‌عنوان نقشه راهی برای پژوهشگران و طراحان سیستم‌های قدرت در توسعه راهکارهای تاب‌آور و انعطاف‌پذیر مورد استفاده قرار گیرد [۱]–[۴۲].

سپاسگزاری

از کلیه اعضای محترم هیات علمی گروه برق و حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول که در نشر و چاپ این نشریه کمک می‌کنند صمیمانه سپاسگزاریم.

References
مراجع

[1] M. Martínez, C. Mateo, T. Gómez, B. Alonso, and P. Frías,“A hybrid particle swarm optimization approach for explicit flexibility procurement in distribution network planning,”International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.161, Art. no. 110215, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2024.110215.

[2] M. Ghanbari, A. Mohammadi, M. S. Javadi, and M. H. S. V. Mahdavi, “A comprehensive review on power system resilience: Definition, assessment, and enhancement strategies,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 170, Art. no. 111149, 2025, doi: 10.1016/j.ijepes.2025.111149.

[3] S. Mohseni, S. Fattahi, and R. Hemmati, “Stochastic, resilience-oriented optimal sizing of off-grid microgrids considering demand response: An efficiency comparison of state-of-the-art metaheuristics,” Applied Energy, vol. 341, Art. no. 121007, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121007.

[4] A. Umunnakwe, P. M. Siano, and P. K. Muoka, “Quantitative analysis of power systems resilience: Standardization, categorizations, and challenges,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 149, Art. no. 111252, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111252.

[5] R. A. Swief and N. H. El-Amary, “Optimal probabilistic reliable hybrid allocation for system reconfiguration applying WT/PV and reclosures,” Ain Shams Engineering Journal, vol. 11, no. 2, pp. 503–518, 2020, doi: 10.1016/j.asej.2019.09.010.

[6] M. F. Abed Al-Safi, A. Lashkar Ara, and H. Bagheri Tolabi, “Optimal probabilistic scheduling of microgrids for enhancing network resiliency and flexibility using conical self-regulating PSO algorithm,” Ain Shams Engineering Journal, vol. 16, Art. no. 103841, 2025, doi: 10.1016/j.asej.2025.103841.

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]

[7] J. Feng, J. Yang, H. Wang, K. Wang, H. Ji, J. Yuan, and Y. Ma, "Flexible optimal scheduling of power system based on renewable energy and electric vehicles," Energy Reports, vol. 8, pp. 1414–1422, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2021.11.065.

[8] A. Bajwa, H. Mokhlis, and S. Mekholef, "Enhancing power system resilience leveraging microgrids: A review," Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 11, Art. no. 035503, 2019, doi: 10.1063/1.5066264.

[9] S. Chanda, S. Maity and A. De "A differential evolution modified quantum particle swarm optimization algorithm for constrained social welfare optimization in smart grids considering demand response and renewable generation," Microsystem Technologies, 2022, doi: 10.1007/s00542-022-05399-1.

[10] I. M. Diahovchenko, G. Kandaperumal, A. K. Srivastava, Z. I. Maslova, and S. M. Lebedka, "Resiliency-driven strategies for power distribution system development," Electric Power Systems Research, vol. 197, Art. no. 107327, 2021.

[11] J. Wang, X. Zheng, N. Tai, W. Wei, and L. Li, "Resilience-oriented optimal operation strategy of active distribution network," Energies, vol. 12, Art. no. 3380, 2019, doi: 10.3390/en12173380.

[12] C. Menos-Aikateriniadis, I. Lamprinos, and P. S. Georgilakis, "Particle swarm optimization in residential demand-side management: A review on scheduling and control algorithms for demand response provision," Energies, vol. 15, Art. no.2211, 2022, doi: 10.3390/en15062211.

[13] J. N. Chivunga, Z. Lin, and R. Blanchard, "Power systems' resilience: A comprehensive literature review," Energies, vol. 16, Art. no. 7256, 2023, doi: 10.3390/en16217256.

[14] M. A. Mquqwana and S. Krishnamurthy, "Particle swarm optimization for an optimal hybrid renewable energy microgrid system under uncertainty," Energies, vol. 17, Art. no. 422, 2024, doi: 10.3390/en17020422.

[15] F. K. Abo-Elyousr, A. M. Sharaf, M. M. F. Darwish, M. Lehtonen, and K. Mahmoud, "Optimal scheduling of DG and EV parking lots simultaneously with demand response based on self-adjusted PSO and K-means clustering," Energy Science & Engineering, 2022, doi: 10.1002/ese3.1264.

[16] G. Liu, T. Jiang, and T.B. Ollis, "Resilient distribution system leveraging distributed generation and microgrids, a review" IET Energy Systems Integration, vol. 2, pp. 289–304, 2020, doi: 10.1049/iet-esi.2019.0134.

[17] B. Yang, S. Ge, H. Liu, J. Li, and S. Zhang, "Resilience assessment methodologies and enhancement strategies of multi-energy cyber-physical systems of distribution network,"IET Energy Systems Integration, vol. 4, pp. 171–191, 2022,doi:10.1049/esi2.12067.

[18] H. Raoufi, V. Vahidinasab, "Power system resilience assessment considering critical infrastructure resilience approaches and government policymaker criteria," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 15, pp. 2819–2834, 2021, doi:10.1049/gtd2.12218.

[19] S. A. Modaberi, S. Tohidi, and S. G. Zadeh, "A review of power system resilience assessment and enhancement approaches by focusing on wind farms and wind turbines," IET Renewable Power Generation, vol. 17, pp. 2391–2410, 2023, doi:10.1049/rpg2.12722.

[20] W. Xiao, Q. Fang, T. Li, W. Li, and F. Yang, "A rapid resilient critical load recovery of microgrid network using Floyd-based particle swarm Optimisation,"IET Smart Grid, vol. 8, 2025 doi: 10.1049/stg2.70030.

[21] L. Huang, A. M. Mohsen, H. A. Kenjrawy, M. H. Almaamori, J. Zhang, and H. Rahbarimagham, "Robust resilient operation of the renewable energy based two-way electricity distribution network in the presence of energy storage and demand response programs," Int. J. Energy Res., vol. 2025, Art. ID 2067840, 2025, doi: 10.1155/er/2067840.

[22] T. Kerdphol, Y. Qudaih, and Y. Mitani, "Optimum battery energy storage system using PSO considering dynamic demand response for microgrids," Electrical Power and Energy Systems, vol. 83, pp. 58–66, 2016, doi:10.1016/j.ijepes.2016.03.064

[23] M. Mahzarnia, M. P. Moghaddam, P. T. Baboli, and P. Siano, "A review of the measures to enhance power systems resilience," IEEE Systems Journal, early access.

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

[24] A. Mpaka and S. Krishnamurthy, “Optimized demand-side management for large power consumers using PSO and MLIP algorithms: A case study of the Western Cape municipality,” International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications, 2025, doi: 10.36922/IJOCTA.025310136.

[25] D. K. Mishra, M. Jabbari Ghadi, A. Azizivahed, L. Li, and J. Zhang, “A review on resilience studies in active distribution systems,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 135, Art. no. 110201, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110201.

[26] S. Mousavizadeh, T. Ghanizadeh Bolandi, M.-R. Haghifam, M. Moghimi, and J. Lu, “Resiliency analysis of electric distribution networks: A new approach based on modularity concept,” Electrical Power and Energy Systems, vol. 117, Art. no. 105669, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105669

[27] M. A. Mohamed, T. Chen, W. Su, and T. Jin, “Proactive resilience of power systems against natural disasters: A literature review,” IEEE Access, vol. 7, pp. 163778–163795, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952362.

[28] M. T. Hossain et al., “Next generation power inverter for grid resilience: Technology review,” Heliyon, vol. 10, Art. no. e39596, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39596.

[29] H. Li, Y. Liu, J. Zhu, and Q. Liao, “Residential demand response scheduling optimization and simulation based on an improved PSO algorithm,” Journal of System Simulation, vol. 33, no. 8, 2021, doi: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-FZ0473.

[30] A. Kerboua, F. Boukli-Hacene, and K. A. Mourad, “Particle swarm optimization for micro-grid power management and load scheduling,” International Journal of Energy Economics and Policy, vol. 10, no. 2, pp. 71–80, 2020, doi: 10.32479/ijeep.8568.

[31] H. M. Soliman and M. S. Mahmoud, “Resilient static output feedback power system stabilizer using PSO-LMI optimisation,” International Journal of Systems, Control and Communications, vol. 5, no. 1, pp. 74–91, 2013.

[32] L. Meegahapola, S. J. Andreasen, S. Chandorkar, and J. Guerrero, “Stability and control aspects of microgrid architectures—A comprehensive review,” IEEE Access, vol. 8, pp. 183–210, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014977.

[33] H. Raoufi, V. Vahidinasab, and K. Mehran, “Power systems resilience metrics: A comprehensive review of challenges and outlook,” Sustainability, vol. 12, Art. no. 9698, 2020, doi: 10.3390/su12229698.

[34] F. B. Gurbuz, S. Bayhan and S. Demirbas, "PSO-Based Frequency and Voltage Restoration with Virtual Impedance in Droop Control for Islanded Microgrid," 2024 4th International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE), Doha, Qatar, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/SGRE59715.2024.10428958

[35] M. Ahmed, L. Meegahapola, A. Vahidnia, and M. Datta, “Stability and control aspects of microgrid architectures—A comprehensive review,” IEEE Access, vol. 8, Art. no. 3014977, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014977

[36] H. Raoufi, V. Vahidinasab, and K. Mehran, “Power systems resilience metrics: A comprehensive review of challenges and outlook,” Sustainability, vol. 12, Art. no. 9698, 2020, doi:10.3390/su12229698.

[37] F. A. Zaini, M. F. Sulaima, I. A. W. A. Razak, N. I. Zulkafli and H. Mokhlis, "A Review on the Applications of PSO-Based Algorithm in Demand Side Management: Challenges and Opportunities," in IEEE Access, vol. 11, pp. 53373-53400, 2023, doi:10.1109/ACCESS.2023.3278261

[38] S. Kumar, A. Gupta and R. K. Bindal, "PSO-Based Optimization for Intelligent Grids: An Approach to Islanding Prevention and Detection in Hybrid Generation Systems," 2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kamand, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCCNT61001.2024.10724131.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

[39] N. Bayat and J. -H. Park, "Particle Swarm Optimization Based Demand Response Using Artificial Neural Network Based Load Prediction," 2022 North American Power Symposium (NAPS), Salt Lake City, UT, USA, 2022, pp. 1-5, doi:10.1109/NAPS56150.2022.10012263

[40] S. Kumar, A. Gupta and R. K. Bindal, "PSO-Based Optimization for Intelligent Grids: An Approach to Islanding Prevention and Detection in Hybrid Generation Systems," 2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT),Kamand, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCCNT61001.2024.10724131

[41] P. Kundur,Power System Stability and Control,New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.

[42] J. Kennedy and R. Eberhart, Swarm Intelligence, San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann, 2001.

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.549] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-28]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025