

بهره‌برداری بهینه ریز شبکه‌های چند حامله انرژی تاب آور تحت رویدادهای با احتمال کم و تأثیر بالا

سینا صمدی قره ورن^{۱*}، مهروز نصیری^۲، سعید قاسم‌زاده^۳

۱- استادیار و ۳- استاد دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ۲- پژوهشگر، شرکت توزیع نیروی برق استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۸، انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۴)

چکیده

در سال‌های اخیر، بلایای ناشی از شرایط آب‌وهوایی شدید به سیستم‌های برق آسیب‌های جبران‌ناپذیری وارد کرده‌اند که توجه برنامه‌ریزان را به افزایش تاب‌آوری این سیستم‌ها جلب کرده است. در راستای اهداف این مسئله، این مقاله یک برنامه‌ریزی دومرحله‌ای بر اساس مدل تاب‌آوری معرفی می‌کند تا طراحی پنل‌های خورشیدی، میکرو توربین‌ها و پیل سوختی را در شبکه میکرو چند حامل انرژی به‌منظور افزایش تاب‌آوری سیستم در برابر رویدادهای با تأثیر بالا انجام دهد. چارچوب پیشنهادی به‌صورت برنامه‌ریزی مختلط صحیح درجه دوم فرموله شده است که در مرحله اول تصمیمات سرمایه‌گذاری را می‌گیرد و در مرحله دوم متغیرهای بهره‌برداری را بهینه‌سازی می‌کند تا تاب‌آوری سیستم را تقویت کند. یک مدل یکپارچه برق و گاز برای افزایش درک خوانندگان از تعاملات متقابل بین انرژی الکتریکی و حرارتی استفاده می‌شود؛ بنابراین، دسترسی به سوخت و قیمت میکرو توربین به‌طور صریح فرموله و ارزیابی می‌شود. یک نمودار خطی از شبکه‌های میکرو انرژی ۱۴ باسه به‌منظور بررسی کارایی و کارآمدی مدل پیشنهادی استفاده می‌شود. مطالعات مقایسه‌ای به‌صورت عددی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی به اپراتور شبکه میکرو کمک می‌کند تا راه‌حل‌های بهینه برای تقویت تاب‌آوری سیستم برق در برابر رویدادهای شدید را شناسایی کند.

کلیدواژه‌ها: برنامه‌ریزی دومرحله‌ای، بهینه‌سازی، تاب‌آوری، ریز شبکه‌های چند حامله.

Optimum Operation of Resilient Multi-Energy Microgrids under Low Probability and High Impact Events

S. Samadi Gharehveran^{1*}, M. Nasiri, S. Ghassem Zadeh

University of Tabriz, Tabriz, Iran

(Received: 2020/03/31, Revised: 2020/05/12, Accepted: 2020/06/08, Published: 2020/06/18)

Abstract

In recent years, disasters caused by extreme weather conditions have caused irreparable damage to power systems, which has attracted the attention of planners to increase the resilience of these systems. In line with the objectives of this issue, this paper introduces a two-stage planning based on the resilience model to design solar panels, microturbines, and fuel cells in a multi-energy carrier microgrid in order to increase the resilience of the system against high-impact events. The proposed framework is formulated as a second-order integer mixed programming that makes investment decisions in the first stage and optimizes the operating variables in the second stage to enhance the resilience of the system. An integrated electricity and gas model is used to enhance the readers' understanding of the mutual interactions between electrical and thermal energy; therefore, the fuel availability and price of the microturbine are explicitly formulated and evaluated. A linear diagram of 14-bus micro-energy grids is used to investigate the efficiency and effectiveness of the proposed model. Numerical comparative studies show that the proposed method helps the micro-grid operator to identify optimal solutions to enhance the resilience of the power system against extreme events.

Keywords: Multi-Energy Microgrids, Optimization, Resiliency, Two-Stage Scheduling.

*Corresponding Author E-mail: s.samadi@tabrizu.ac.ir

به‌عنوان مثال کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و هزینه‌های عملیاتی، گازهای گلخانه‌ای و همچنین هزینه‌های برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری.

یک الگوریتم جایابی منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع در شرایط مختلف عدم قطعیت ارائه شده است [۱۰] و هدف اصلی کاهش کل تلفات توان و بهبود پروفایل ولتاژ است. الگوریتم ژنتیک مبتنی بر احتمال تطبیقی عبور برای حل مسئله فرمول‌بندی شده اعمال می‌شود. از طرف دیگر، یک روش بهینه‌سازی فاصله برای تعیین اندازه بندی بهینه باتری در یک سیستم قدرت هیبریدی خورشیدی/دیزلی برای کاهش هزینه سوخت، هزینه سرمایه‌گذاری سیستم ذخیره‌سازی انرژی و انتشار CO₂ پیشنهاد شده است [۱۱]. یک مدل برنامه‌نویسی تصادفی دومرحله‌ای نیز برای تعهد واحد کوتاه‌مدت و اتصال اقتصادی با استفاده از روش تصمیم مارکوف فرمول‌بندی شده است [۱۲]. با استفاده از روش تصمیم مارکوف، تمام هزینه‌های بهره‌برداری آینده، ظرفیت‌یابی بهینه مزرعه بادی و سیستم‌های ذخیره‌سازی بر اساس بهینه‌سازی تابع جایگزین تعیین می‌شود. یک مدل چندهدفه نیز برای مشخص کردن ضریب توان بهینه برای کمینه کردن کل تلفات توان و بهبود پایداری ولتاژ در شبکه‌های توزیع صنعتی در یک افق برنامه‌ریزی داده شده پیشنهاد شده است [۱۳].

یک روش بهینه‌سازی تصادفی محدودیت شانس را برای یافتن جایابی بهینه و اندازه بندی باتری در شبکه توزیع، باهدف کاهش استفاده از انرژی بادی و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری پیشنهاد شده است [۱۴]. همچنین، ترکیبی از روش‌های تحلیلی و الگوریتم ژنتیک را برای یافتن محل بهینه و ظرفیت واحدهای تولید پراکنده در سیستم توزیع برای کمینه کردن تلفات سیستم ارائه شده است [۱۵]. با این حال، بسیاری از گزارشات فوق قیمت سوخت و در دسترس بودن واحدهای گرمایشی تولید پراکنده و میکرو توربین را در نظر نمی‌گیرند. علاوه بر این، منابع مدیریت سمت تقاضا مانند بارهای قابل کنترل به‌طور گسترده در مدل‌های قبلی بررسی نشده‌اند. الگوریتم ژنتیک مبتنی بر مارکوف برای تعیین اندازه‌های بهینه ترکیبی باد، سلول خورشیدی، دیزلی برای یک سیستم قدرت مستقل [۱۶] به کار گرفته شده است. هدف اصلی این مقاله کاهش کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و سوخت درحالی‌که قابلیت اطمینان سیستم و قیود انتشار CO₂ را حفظ می‌کند. یک مدل پویا دومرحله‌ای برای اختصاص یکپارچه توربین‌های بادی، واحدهای خورشیدی، واحدهای غیرقابل تجدید تولید پراکنده و کنتورهای هوشمند به‌طور هم‌زمان با تقویت شبکه برای کمینه کردن کل هزینه‌های اقتصادی و انتشار کربن ارائه شده است [۱۷]. به‌طور

۱. مقدمه

اگرچه مدل ریز شبکه‌ها برای سیستم‌های قدرت آینده طراحی شده است، این مفهوم می‌تواند به انواع مختلفی از پارها، مصرف‌کنندگان، سیستم‌های ذخیره‌سازی و منابع تولید گسترش یابد. ریز شبکه با هزینه‌های قابل‌توجهی مواجه است تا سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و میکرو توربین‌ها را نصب کند تا نفوذ منابع تجدید پذیر را افزایش دهد [۱]. شبکه گاز نقش مهمی در تأمین برق و حرارت ایفا می‌کند؛ زیرا شبکه نمی‌تواند به‌طور کامل به منابع تجدید پذیر تکیه کند [۲]؛ بنابراین، ریز شبکه‌های الکتریکی به ریز شبکه‌های چند حمله انرژی متصل تبدیل می‌شوند [۳]. در سمت عرضه، میکرو توربین هر دو شبکه برق و گاز را به هم متصل می‌کند؛ درحالی‌که سیستم‌های دوگانه سوخت، اتصال شبکه‌های انرژی را در سمت تقاضا افزایش می‌دهند. با نگاهی اجمالی به مطالعات انجام شده در این زمینه، چارچوب‌های بهینه‌سازی به‌طور گسترده‌ای در تحلیل هزینه، برنامه‌ریزی ریز شبکه و مدیریت انرژی استفاده می‌شوند [۴]. طراحی باتری و تولیدات پراکنده برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع می‌تواند به دودسته تقسیم شود: تعیین ظرفیت و مکان منابع [۵]، [۶].

در ادامه به‌طور خلاصه به چند گزارش در این زمینه اشاره می‌شود. یک مدل برنامه‌نویسی خطی را برای طراحی بهینه ریز شبکه چند حمله انرژی مدل‌سازی شده است [۷]. معادلات انتقال حرارت و جریان توان الکتریکی انجام شده‌اند و بنابراین، قیود فنی شبکه‌های گرمایش/سرمایش و الکتریکی می‌توانند فرمول‌بندی شوند. با این حال این مرجع انرژی حرارتی/سرمایشی را به‌طور صریح مدل‌سازی نکرده است، بلکه فقط قیود تعادل انرژی را در نظر گرفته است. همچنین، مدل‌سازی باتری و خط گاز به‌طور کامل حذف شده است.

جایگذاری بهینه تولید حرارت و برق ترکیبی مبتنی بر ریز شبکه را بر اساس شبکه‌های توزیع انرژی شهری با پیشنهاد یک مدل یکپارچه سیستم اتصال شامل مدل‌های شبکه برق، آب و گاز بررسی شده است [۸]. این مدل می‌تواند به‌طور مؤثری اثرات متقابل بر عملکرد بهره‌برداری این واحدها مبتنی بر ریز شبکه و شبکه‌های توزیع انرژی را تحلیل کند. با این حال، در این مقاله، اثر پارها و سیستم‌های ذخیره‌سازی قابل کنترل بر هموارسازی انرژی تجدید پذیر و کارایی سیستم بررسی نشده است. در مرجع [۹] یک مدل بهینه‌سازی سه‌هدفه بر اساس الگوریتم ژنتیک سلول‌های خورشیدی جزیره‌ای خارج از شبکه، سیستم‌های توربین بادی، سیستم‌های هیبریدی باتری و ژنراتورهای دیزلی ارائه شده است. اهداف این مقاله بهینه‌سازی هزینه چرخه عمر، انتشار CO₂ و تخلیه انرژی به‌طور هم‌زمان است. روش پیشنهادی می‌تواند توابع هدف در نظر گرفته شده در مسائل را کاهش دهد،

متوسط حالت پایدار در یک خط لوله گاز در معادله (۳) نشان داده شده است [۱۸].

$$\frac{P_0}{h_0 k_0} = \frac{P}{hk^{Gas}} = \theta \quad (1)$$

$$p^{Ave} H_{ij} = p_0 H_0 \quad (2)$$

$$P_{ij}^{Ave} = \sqrt{\frac{1}{2}(p_i^2 + p_j^2)} \quad (3)$$

حداکثر میزان انتقال گاز اولیه اندازه‌گیری شده در انرژی $W_{ij}^{initial}$ در شرایط عادی در معادله (۴) ارائه شده است.

$$W_{ij}^{initial} = \frac{(\Lambda \cdot P_{ij}^{Ave} \cdot H_{ij})}{(h_0 \cdot k_0 \cdot \theta)} \quad (4)$$

در شرایط پویا، طبق قانون تبدیل جرم، با گاز اولیه ذخیره شده در لوله‌ها و تغییر خالص بین گاز تولید شده و مصرف شده در یک لوله تغییر می‌کند. Line Pack پویا و محدودیت آن در معادلات (۵) تا (۷) ارائه شده است.

$$W_{ij,t+1} = W_{ij,t} + P_{ij,t}^{Gas} \Delta t \quad (5)$$

$$P_{ij,t}^{Gas} = P_{Gijt}^{Gas} - P_{Dijt}^{Gas} - P_{ijt}^{Gas,Comp} \quad (6)$$

$$W_{ij,t}^{min} \leq W_{ij,t} \leq W_{ij,t}^{max} \quad (7)$$

معادله جریان: فرمول Weymouth برای فرمول بندی جریان گاز در شرایط پایدار استفاده می‌شود. جریان گاز (۸) و جهت (۹) با تغییرات فشار گرهی مرتبط هستند [۱۸].

$$S_{ij}^{Gas} = \text{sgn}(p_i, p_j) \cdot \Phi_{ij} \cdot \sqrt{|p_i^2 - p_j^2|} \quad (8)$$

$$\text{sgn}(p_i, p_j) = \begin{cases} 1; & \text{if } p_i \geq p_j \\ -1; & \text{if } p_i < p_j \end{cases} \quad (9)$$

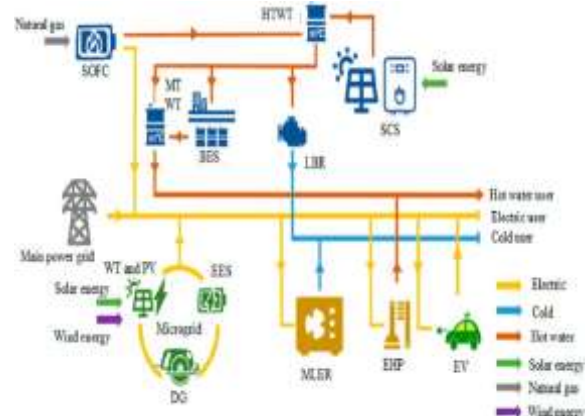
معادله ایستگاه کمپرسور: انرژی مورد استفاده توسط یک کمپرسور گاز به دو عامل بستگی دارد: (۱) مقدار جریان گاز؛ (۲) اختلاف بین مقدار فشار گاز خروجی و ورودی، که در معادلات (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. همچنین، نسبت فشار کمپرسور در معادله (۱۲) محدود می‌شود.

$$S_{ij}^{Gas,Comp} = \text{sgn}(p_i, p_j) \cdot \frac{HP_{ij}}{\gamma_{1,ij} - \gamma_{2,ij} \cdot \left[\frac{\max(p_i, p_j)}{\min(p_i, p_j)} \right]^{\gamma_{3,ij}}} \quad (10)$$

$$P_i^{Gas,Comp}(HP_{ij}) = b_{3,ij}^{Comp} + b_{2,ij}^{Comp} \cdot HP_{ij} + b_{1,ij}^{Comp} \cdot HP_{ij}^2 \quad (11)$$

خلاصه، شکاف‌های تحقیقاتی متعددی در مقالات وجود دارد که این مقاله سعی در پاسخگویی به آن‌ها دارد:

- پیشنهاد یک چارچوب تصمیم‌گیری دومرحله‌ای کارآمد از نظر محاسباتی برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری مشترک واحدهای ذخیره‌سازی انرژی متحرک برای تقویت تاب‌آوری سیستم‌های توزیع در برابر رویدادهای شدید پیشنهاد می‌کند.
- در این مقاله تعاملات بین انرژی الکتریکی و حرارتی بررسی می‌شود، به طوری که مدل پیشنهادی راه‌حل‌های برنامه‌ریزی بهینه را از یک دیدگاه یکپارچه ارائه می‌دهد.
- برای تعیین صحیح تاب‌آوری سیستم توزیع، ما یک شاخص عملکردی وابسته به زمان را برای اندازه‌گیری اثربخشی برنامه پیشنهادی بر تاب‌آوری سیستم‌های برق - گاز وابسته به هم به شیوه‌ای منطقی توسعه داده‌ایم.



شکل ۱. ساختار کلی ریز شبکه با حامل‌های انرژی متعدد [۱۲]

بر اساس شکل (۱)، فرض می‌شود که اپراتور سیستم به‌طور هم‌زمان برنامه‌ریزی و بهره‌برداری ریز شبکه انرژی را انجام می‌دهد. اپراتور ریز شبکه می‌تواند هزینه خرید انرژی در عمده‌فروشی بازارهای برق و گاز طبیعی را با سرمایه‌گذاری و استفاده بهینه از منابع انرژی تولید پراکنده از جمله پیل سوختی، سلول خورشیدی، میکرو توربین و ذخیره‌ساز باتری در ریز شبکه به حداقل برساند. پایه بازار برق بر اساس ۵ دقیقه است، در حالی که پایه بازار عمده‌فروشی گاز بر اساس ۴ ساعت در روز و ۸ ساعت در شب است.

۲. مدل‌سازی مسئله

مدل شبکه گاز: مقدار گاز در داخل سیستم در هر زمان «Line Pack» نامیده می‌شود [۲۱-۲۸]. همچنین، این مقدار به فشار متوسط در یک لوله بستگی دارد. طبق قانون بوی، گاز در لوله‌ها می‌تواند با معادلات (۱) و (۲) تعریف شود. علاوه بر این، فشار

ما فرض می‌کنیم که کلک تورهای بار می‌توانند بار HVAC (سیستم‌های تهویه مطبوع، گرمایش و سرمایش) را مدیریت کنند. مشوق‌هایی که به مصرف‌کنندگان پرداخت می‌شود، انگیزه‌هایی برای تغییر زمان یا میزان مصرف انرژی هستند. این مشوق‌ها می‌توانند به صورت یک تابع هزینه درجه دوم فرمول‌بندی شوند که در معادله (۲۱) آمده است. هدف از پرداخت این مشوق‌ها، تشویق مصرف‌کنندگان به کاهش مصرف در ساعات اوج بار یا تغییر مصرف به زمان‌های کم‌بار است، تا به این ترتیب فشار بر شبکه کاهش یابد و هزینه‌های انرژی به حداقل برسد.

$$C_{ii}^{LL} = \frac{1}{2} I_1 (P_{ii}^{LL})^2 + I_2 P_{ii}^{LL}, \forall I \in \Omega_D \quad (21)$$

$$\phi_{ii}^{\min} P_{Dii} \leq P_{ii}^{LL} \leq \phi_{ii}^{\max} P_{Dii} \quad (22)$$

۳. چارچوب تصادفی پیشنهادی

جایابی بهینه سلول خورشیدی، میکرو توربین و باتری و بهره‌برداری بهینه ریز شبکه چند حامله انرژی مرتبط در دو فاصله زمانی هماهنگ شده شناسایی می‌شوند. مسئله پیشنهادی به عنوان یک برنامه‌نویسی مبتنی بر سناریوی دومرحله‌ای مدل‌سازی می‌شود که در آن متغیرهای اینجا و اکنون قبل از حادثه تعیین می‌شوند و متغیرهای صبر و مشاهده پس از حادثه تعیین می‌شوند. به عبارت دیگر، صبر و مشاهده تابعی از متغیرهای اینجا و اکنون هستند که پس از تعیین سناریوها در مرحله اول شناسایی می‌شوند. مسئله جایابی باتری تصمیمات مرحله اول است که قبل از تحقق واقعی داده‌های غیرقابل اطمینان در سطح بهره‌برداری گرفته می‌شود. پس از اینکه داده‌های عدم قطعیت می‌توانند تحقق یابند، مسئله بهره‌برداری مانند برنامه‌ریزی باتری و منابع پراکنده تصمیمات مرحله دوم هستند که برای جبران تفاوت بین واقعیت و پیش‌بینی در مرحله اول گرفته می‌شوند. معادله (۲۳) تابع هدف احتمالاتی دومرحله‌ای پیشنهادی را نشان می‌دهد که شامل هر دو هزینه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم است.

$$\text{Min}A(\lambda) + OC \quad (23)$$

$$A(\lambda) = \sum_{i \in \Omega_N} \lambda_i^{BESS} \cdot CF^{BESS} \cdot E_R^{BESS} + \lambda_i^{MT} \cdot CF^{MT} \cdot P_{Gi}^{\max} + \lambda_i^{PV} \cdot CF^{PV} \cdot P_i^{PV, \max} \quad (24)$$

۳-۱. مدل‌سازی مرحله دوم

هدف مرحله دوم در معادله (۲۳) کمینه کردن کل هزینه‌های بهره‌برداری است.

$$CPR_{ij}^{Comp, \min} \leq \frac{\max(P_i, P_j)}{\min(P_i, P_j)} \leq CPR_{ij}^{Comp, \max} \quad (12)$$

مدل سلول‌های خورشیدی: سیستم‌های فتوولتائیک فناوری‌هایی هستند که برای تبدیل انرژی خورشیدی به برق استفاده می‌شوند، که می‌توانند به شبکه برق یا شبکه مستقل متصل شوند و به طور مستقل عمل کنند. در مسئله پیشنهادی، خروجی سلول‌های خورشیدی به عنوان یک تابع خطی از تابش خورشیدی در معادله (۱۳) مدل‌سازی می‌شود [۱۹].

$$P_{ii}^{PV} (I_{ii}) = \eta_{PV} \cdot AS_{ii} \cdot I_{ii} \cdot (1 - 0.005(t_0 - 25)) \quad (13)$$

مدل هزینه پیل سوختی: واحدهای سلول سوختی یک روش الکتروشیمیایی را برای تبدیل اکسیژن و هیدروژن به برق و حرارت بدون آلودگی اعمال می‌کنند. تابع هزینه پیل سوختی و محدودیت خروجی توان به ترتیب در معادلات (۱۴) و (۱۵) ارائه شده است.

$$C_{ii}^{Cell} (P_{ii}^{Cell}) = \alpha_{ii} \cdot P_{ii}^{Cell} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{ii}^{Cell} \leq P_{ii}^{Cell, \max} \quad (15)$$

مدل هزینه پیل سوختی: سیستم آب گرم نقش مهمی در ذخیره انرژی بدون هزینه‌های بهره‌برداری ایفا می‌کند. در عین حال، بار HVAC نوعی بار قابل قطع است که از طریق کلک تور مدیریت و نظارت می‌شود. اگر مصرف‌کنندگان در کاهش یا افزایش مصرف انرژی HVAC مشارکت کنند، مشوق‌هایی را در مقابل اقداماتی که برای افزایش منافع اپراتور شبکه انجام می‌شود، دریافت خواهند کرد.

در این مقاله، فرض می‌شود که حجم آب در سیستم آب گرم ثابت است. همچنین، مقدار اتلاف عایق سیستم آب گرم به عنوان یک تابع خطی از دمای آب ورودی فرض می‌شود. دمای فرض شده برای آب ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. این سیستم در معادله (۱۶) فرمول‌بندی شده است. معادله (۱۷) تقاضای انرژی سیستم آب گرم در زمان t و باس i را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۸) محدودیت دمای آب را نشان می‌دهد. اتلاف انرژی با معادله (۱۹) تعیین می‌شود؛ و (۲۰) قیود مربوط به انرژی اولیه و نهایی ذخیره‌شده در سیستم آب گرم را بیان می‌کند.

$$E_{ii}^{HWS} = E_{t-1,i}^{HWS} + y_{ii}^{HWS} \eta^{HWS} P_i^{HWS, \max} \Delta t - E_{Dii}^{HWS} - E_{ii}^{Loss} \quad (16)$$

$$E_{ii}^{HWS} = \frac{(K_{ii}^{HWS} - K_0) \cdot \Psi \cdot V_i}{3600} \quad (17)$$

$$K_{ii}^{HWS, \min} \leq K_{ii}^{HWS} \leq K_{ii}^{HWS, \max} \quad (18)$$

$$E_{ii}^{Loss} = \varpi \cdot (K_{ii}^{HWS} - K_0) \quad (19)$$

$$E_{0i}^{HWS} = E_{i, \text{Initial}}^{HWS} \cdot E_{T_i}^{HWS} \geq E_{i, \text{End}}^{HWS} \quad (20)$$

$$W_{ij,t+1} = W_{ij,t} + P_{ij}^{CLP} \Delta t - P_{ij}^{DLP} \Delta t + P_{ij}^{CLP} \Delta t - P_{ij}^{DLP} \Delta t \quad (۳۵)$$

$$W_{ij,t}^{\min} \leq W_{ij,t} \leq W_{ij,t}^{\max} \quad (۳۶)$$

$$0 \leq P_{ij}^{CLP} \leq y_{ij}^{CLP} \cdot DF \quad (۳۷)$$

$$0 \leq P_{ij}^{DLP} \leq y_{ij}^{DLP} \cdot DF \quad (۳۸)$$

$$y_{ij}^{DLP} + y_{ij}^{CLP} \leq 1 \quad (۳۹)$$

قیود (۳۷) و (۳۸) محدودیت شارژ و دشارژ بسته خط را نشان می‌دهند. محدودیت (۳۹) مجموع شارژ و دشارژ بسته خط را نشان می‌دهد.

• قیود تولید واحد خورشیدی و میکرو توربین

$$\lambda_i^{MT} \cdot P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq \lambda_i^{MT} \cdot P_{Gi}^{\max}; \forall i \in \Omega_N \quad (۴۰)$$

$$\lambda_i^{MT} \cdot P_{Gii}^{\min} \leq P_{Dii}^{Gas,MT} \cdot HR^{Gas} \cdot \Delta t \quad (۴۱)$$

$$\begin{cases} P_{Gii} - P_{Gii-1,i} \leq \lambda_i^{MT} \cdot RU_{Gi} \\ P_{Gii-1,i} - P_{Gii} \leq \lambda_i^{MT} \cdot RD_{Gi} \end{cases} \quad (۴۲)$$

$$0 \leq P_{ii}^{PV} \leq \lambda_i^{PV} \cdot P_i^{PV,max} \quad (۴۳)$$

قیود (۴۲) و (۴۳) قیود خروجی توان اکتیو و تقاضای گاز میکرو توربین در زمان t و باس i را به ترتیب نشان می‌دهند. قیود (۴۴) افزایش و کاهش میکرو توربین در باس i را نشان می‌دهد. قید (۴۵) محدودیت خروجی توان خورشیدی را نشان می‌دهد.

• قیود ذخیره‌ساز باتری

$$E_{t+1,i}^{BESS} = E_{t,i}^{BESS} - \Delta P_{ii}^{DBESS} / \left(\eta_D + P_{ii}^{CBESS} \eta_C \Delta t \right) \quad (۴۴)$$

$$\lambda_i^{BESS} \cdot E_R^{BESS} \cdot SOC^{\min} \leq E_{ii}^{BESS} \leq \lambda_i^{BESS} \cdot E_R^{BESS} \cdot SOC^{\max} \quad (۴۵)$$

$$0 \leq P_{ii}^{DBESS} \leq \lambda_i^{BESS} \cdot P^{DBESS,max} \quad (۴۶)$$

$$0 \leq P_{ii}^{CBESS} \leq \lambda_i^{BESS} \cdot P^{CBESS,max} \quad (۴۷)$$

$$E_{0i}^{BESS} \leq \lambda_i^{BESS} \cdot E_{i,Initial}^{BESS} \cdot E_{Ti}^{BESS} \geq \lambda_i^{BESS} \cdot E_{i,End}^{BESS} \quad (۴۸)$$

معادله (۴۵) انرژی ذخیره‌شده در باتری در زمان t باس i را نشان می‌دهد و معادله (۴۷) محدوده حداقل و حداکثر انرژی ذخیره‌شده در باتری را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۴۸) و (۴۹) محدودیت‌های حداکثر شارژ و دشارژ توان را به ترتیب نشان می‌دهند. معادله (۵۰) انرژی اولیه و نهایی باتری را تعریف می‌کند.

• قیود ذخیره سیستم

$$\begin{cases} \sum_{i \in \Omega_s} \lambda_i^{MT} P_{Gi}^{\max} + \sum_{i \in \Omega_s} \lambda_i^{PV} P_i^{PV,max} + P^{Ex,max} \geq \sum_{i \in \Omega_s} (1 + RU) P_{Dii} \\ \sum_{i \in \Omega_s} \lambda_i^{MT} P_{Gi}^{\min} + P^{Ex,max} \leq \sum_{i \in \Omega_s} (1 + RD) P_{Dii} \end{cases} \quad (۴۹)$$

محدودیت‌های افزایش و کاهش ذخیره سیستم در معادله (۵۱) ارائه شده است.

$$OC = E \left[\begin{matrix} C_1(P_{Gii}) + C_2(P_{ii}^{IL}) \\ + C_3(P_{ii}^{BESS}) + C_4(P_{ii}^{Cell}) \\ + C_5(P_{ii}^{Ex}) + C_6(P_{Gii}^{Gas}) \end{matrix} \right] \quad (۲۵)$$

هر تابع در معادله (۲۵) به صورت زیر به دست می‌آید. معادلات (۲۶) تا (۳۱) تابع هزینه میکرو توربین، باتری، پیل سوختی و بارهای قابل قطع، تبادل توان با شبکه بالادست و گاز خریداری شده را نشان می‌دهند.

$$\begin{cases} C_1(P_{Gii}) = \sum_{i \in \Omega_N} \sum_{t \in T} [a_{1i} P_{Gii}^2 + a_{2i} P_{Gii}] \\ a_{1i} = CVF_1 \cdot z_i^{Gas} \\ a_{2i} = CVF_2 \cdot z_i^{Gas} \end{cases} \quad (۲۶)$$

$$C_2(P_{ii}^{IL}) = \sum_{i \in \Omega_N} \sum_{t \in T} \left[\frac{1}{2} l_1 (P_{ii}^{IL})^2 + l_2 P_{ii}^{IL} \right] \quad (۲۷)$$

$$C_3(P_{ii}^{BESS}) = \sum_{i \in \Omega_N} \sum_{t \in T} [\phi^{BESS} \cdot P_{ii}^{DBESS} + \phi^{BESS} \cdot P_{ii}^{CBESS}] \quad (۲۸)$$

$$C_4(P_{ii}^{Cell}) = \sum_{i \in \Omega_N} \sum_{t \in T} \alpha_{1i} \cdot P_{ii}^{Cell} \quad (۲۹)$$

$$C_5(P_{ii}^{Ex}) = f_5(P_i^{Imp}, P_i^{Exp}) = \sum_{t \in T} z_i^{Imp} \cdot P_i^{Imp} - \sum_{t \in T} z_i^{Exp} \cdot P_i^{Exp} \quad (۳۰)$$

$$C_6(P_{Gii}^{Gas}) = \sum_{t \in T} z_i^{Gas} \cdot P_{Gii}^{Gas} \quad (۳۱)$$

۲-۳. قیود مدل سازی

• معادله تعادل توان

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها در عملیات ایمن سیستم‌های قدرت، معادله تعادل توان است که فرکانس شبکه را در مقدار اسمی ثابت نگه می‌دارد. این نشان می‌دهد که در همه زمان‌ها تولید کل باید برابر با مصرف کل باشد تا شبکه به صورت دینامیکی پایدار باقی بماند. معادله ریاضی محدودیت تعادل توان به صورت (۳۲) است. سمت چپ این معادله تعادل مصرف‌شده توسط تجهیزات و سمت راست توان تولیدشده را نشان می‌دهد.

$$\begin{cases} \{ P_{Dii} + P_{ii}^{CBESS} - P_{ii}^{IL} - P_{Dii}^{Curt} + P_i^{Exp} \} \\ = \left\{ P_{Gii} + P_{ii}^{PV} + P_{ii}^{DBESS} \right. \\ \left. - y_{ii}^{HWS} P_i^{HWS,max} + P_{ii}^{Cell} + P_i^{Imp} \right\} \end{cases} \quad (۳۲)$$

• معادله تعادل گاز

مانند شبکه برق، معادله تعادل نیز برای شبکه گاز طبیعی تعریف شده است (۳۳). در این معادله، گاز تولیدشده توسط منابع گاز باید برابر با گاز مصرف‌شده بارها باشد.

$$\begin{cases} \{ P_{Gii}^{Gas} + P_{ii}^{DLP} + \sum S_{ij}^{Gas} \} \\ = \{ \sum S_{tji}^{Gas} + P_{Dii}^{Gas} + P_{ii}^{CLP} + P_{ii}^{Gas,Comp} \} \end{cases} \quad (۳۳)$$

$$P_{Dii}^{Gas} = P_{Dii}^{Gas,MT} + P_{Dii}^{Gas,Heat} \quad (۳۴)$$

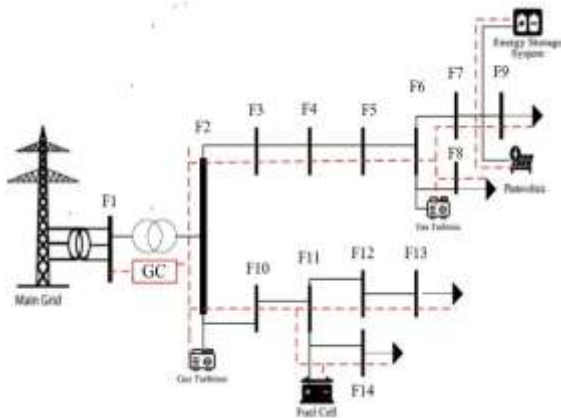
• حداکثر میزان انتقال گاز

جدول ۲- اطلاعات فنی باتری.

عنوان	مقدار	عنوان	مقدار
ظرفیت شارژ	۶۰۰ کیلووات	راندمان دشارژ	۸۲%
ظرفیت دشارژ	۴۵۰ کیلووات	چرخه عمر	۲۸۰۰ بار
ظرفیت انرژی	۸۰۰ کیلووات ساعت	انرژی اولیه / نهایی	۲۰۰ کیلووات ساعت
راندمان شارژ	۸۸%	هزینه سرمایه‌گذاری	۳۶۸ دلار/کیلووات

۴. نتایج و بحث

در این بخش، رویکرد پیشنهادی بر روی یک مطالعه موردی اجرا شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ارائه و بررسی شده است. هدف اصلی مدل پیشنهادی بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع در برابر سیلاب‌های شدید از طریق برنامه‌ریزی بهینه ذخیره‌سازی انرژی و واحدهای منابع تولید پراکنده در ریز شبکه‌ها است. پارامترهای فنی و اطلاعات واحدهای منابع مورد استفاده در شبکه در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. شکل (۶) نشان‌دهنده فلوچارت مربوط به این پژوهش است.



شکل ۲. ریز شبکه انرژی ۱۴ باسه مورد مطالعه [۱۶]

در این مقاله، چهار مطالعه موردی مختلف برای روشن کردن عملکرد و کاربرد مدل مطرح شده در بهبود تاب‌آوری سیستم قدرت اجرا می‌شود:

- مطالعه موردی ۱: بدون در نظر گرفتن برنامه‌ریزی احتمالاتی منابع تولید پراکنده و ریز شبکه (مورد اولیه)
- مطالعه موردی ۲: برنامه‌ریزی احتمالاتی تک‌مرحله‌ای برای ریز شبکه‌ها متعارف
- مطالعه موردی ۳: برنامه‌ریزی احتمالاتی دومرحله‌ای با بهره‌برداری جداگانه گاز و برق
- مطالعه موردی ۴: برنامه‌ریزی احتمالاتی دومرحله‌ای برای ریز شبکه انرژی متصل

• قیود اتصال

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{Imp} \leq y_t^{Imp} P^{Ex,max} \\ 0 \leq P_t^{Exp} \leq y_t^{Exp} P^{Ex,max} \end{cases} \quad (50)$$

$$y_t^{Imp} + y_t^{Exp} \leq 1 \quad (51)$$

قید (۵۲) محدوده خرید و فروش توان با شبکه بالادست را نشان می‌دهد. قید (۵۳) نشان می‌دهد که مجموع توان وارد شده و خارج شده نمی‌تواند در یک زمان برابر ۱ باشد، که بیان می‌کند که خروجی و ورودی توان هم‌زمان امکان‌پذیر نیست.

• شاخص ارزیابی تاب‌آوری

اگرچه شاخص‌های متعددی در مقالات برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع وجود دارد، اما آن‌ها قادر نیستند رفتار سیستم را در شرایط غیرقابل پیش‌بینی مانند رویدادهای نادر با تأثیر بالا به‌طور مناسب نشان دهند. برای این منظور، شاخص‌های جدیدی برای اندازه‌گیری تاب‌آوری سیستم قدرت از دیدگاه‌های مختلف مورد نیاز است. در این راستا، این مقاله دو معیار جدید برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم در هر دو حالت متصل و جزیره‌ای پیشنهاد می‌کند.

$$RAI = \frac{\sum_{TS} SD_{TS} \cdot \Delta_{TS}}{NI} \leq RAI^{T arg et} \quad (52)$$

$$RSI = \frac{\sum_{TS} (D_{TS} - P_{TS}) \cdot \Delta_{TS}}{NI} \leq RSI^{T arg et} \quad (53)$$

در این معادلات، شاخص ارزیابی تاب‌آوری^۱ (RAI) نشان‌دهنده انرژی بار قطع شده مورد انتظار در حالت جزیره‌ای یک μG به دلیل کمبود توان در دسترس (۵۳) است و همچنین، شاخص بازیابی^۲ (RSI) به کمبود انرژی متوسط در حالت جزیره‌ای به دلیل ساعتی که بار جزیره‌ای از کل تولید توان بازیابی در دسترس فراتر می‌رود.

جدول ۱- داده‌های میکرو توربین.

عنوان	مقدار	عنوان	مقدار
حداقل ظرفیت	۴۰۰ کیلووات	نرخ افزایش	۲۵ کیلووات/دقیقه
حداکثر ظرفیت	۱۲۰۰ کیلووات	هزینه سرمایه‌گذاری	۶۹۰ دلار/کیلووات
طول عمر	۲۰ سال	CVF _۱	۰/۰۰۲۴
نرخ کاهش	۲۰ کیلووات/دقیقه	CVF _۲	۱/۰۲۳۵

^۱ Resilience Assessment Index

^۲ Recovery Strength Index

جدول ۳- نتایج تخصیص مطالعه موردی ۱.

موقعیت		۳	۵	۶	۱۰	۱۲	۱۴
باتری	موقعیت	۴۵۰	۴۰۰	۴۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰
	اندازه (کیلووات ساعت)						
میکرو توربین	موقعیت	۵۰۰	۶۰۰	۵۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۶۰۰
	اندازه (کیلووات ساعت)						
واحد خورشیدی	موقعیت	۲۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰
	اندازه (کیلووات ساعت)						

جدول ۴- نتایج تخصیص مطالعه موردی ۲.

موقعیت		۲	۳	۶	۷	۹	۱۱
باتری	موقعیت	۴۰۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۰۰	۳۰۰
	اندازه (کیلووات ساعت)						
میکرو توربین	موقعیت	۴۵۰	۵۵۰	۵۰۰	۵۰۰	۴۰۰	۵۵۰
	اندازه (کیلووات ساعت)						
واحد خورشیدی	موقعیت	۲۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۲۵۰
	اندازه (کیلووات ساعت)						

جدول ۵- نتایج تخصیص مطالعه موردی ۳.

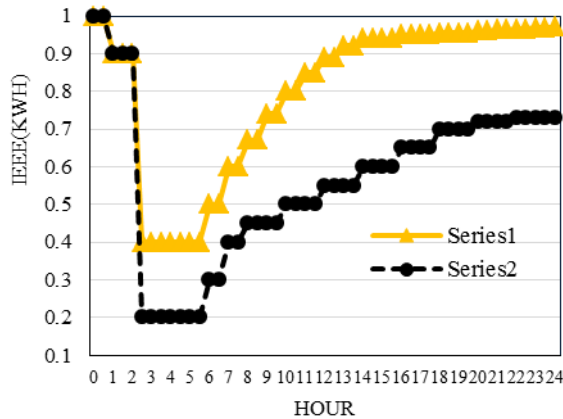
موقعیت		۱	۵	۶	۹	۱۲	۱۴
باتری	موقعیت	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۲۵۰	۲۰۰
	اندازه (کیلووات ساعت)						
میکرو توربین	موقعیت	۴۰۰	۵۰۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۰۰	۵۵۰
	اندازه (کیلووات ساعت)						
واحد خورشیدی	موقعیت	۱۵۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰
	اندازه (کیلووات ساعت)						

جدول ۶- نتایج تفصیلی برای همه مطالعات موردی

عنوان	مورد ۱	مورد ۲	مورد ۳
هزینه سرمایه‌گذاری باتری (دلار)	۳۴۶۸۱/۵۶	۲۹۸۷۴/۳۳	۲۵۹۱۲/۷۴
هزینه سرمایه‌گذاری میکرو توربین (دلار)	۲۹۱۲۵/۸۶	۲۷۴۶۳/۳۲	۲۴۱۲۰/۳۶
هزینه سرمایه‌گذاری واحد خورشیدی (دلار)	۱۷۴۶۳/۳۵	۱۵۸۹۶/۲۱	۱۳۷۷۱/۰۵
هزینه سرمایه‌گذاری کل (دلار)	۸۱۲۷۷/۷۶	۷۳۲۳۴/۸۶	۶۳۸۰۴/۱۵
هزینه بهره‌برداری میکرو توربین (دلار)	۱۲۶۸/۲۲	۱۱۴۳/۹۱	۱۰۲۷/۴۶
هزینه بهره‌برداری واحد خورشیدی (دلار)	۲۱۸/۷۹	۱۹۹/۶۸	۱۹۵/۴۴
هزینه بهره‌برداری باتری (دلار)	۴۵۸/۶۹	۴۲۰/۳۶	۳۹۸/۷۰
هزینه بهره‌برداری کل (دلار)	۱۹۴۵/۷	۱۷۶۳/۹۵	۱۶۲۱/۵۹
هزینه برق (دلار)	۱۰۳۹/۷۴	۹۹۰/۳۶	۹۱۰/۳۶
هزینه گاز (دلار)	۰	۱۸۲۹/۳۷	۱۵۴۴/۷۲
شاخص تاب‌آوری (کیلووات ساعت)	۷۶۹/۳۳	۶۹۵/۱۴	۶۱۵/۲۰
تابع هدف (دلار)	۸۶۷۲۲/۴۹	۷۸۹۸۵/۲۳	۶۷۹۱۴/۰۵
زمان پیاده‌سازی (ثانیه)	۲۱۴۵/۴۲	۱۵۲۰/۸۸	۹۹۱/۳۶

همچنین تراکم شبکه گاز در نظر گرفته نشده است. مهم است که توجه داشته باشید که این دو منبع ممکن است نتوانند خروجی توان حداکثر خود را به شبکه برق تزریق کنند زیرا محدودیت سوخت، منجر به اتلاف توان می‌شود. در واقع، این نشان می‌دهد که طراحی جداگانه ممکن است منجر به هزینه‌های اضافی و ناکارایی در عملیات مقرون‌به‌صرفه کل سیستم شود و می‌تواند عدم انطباق‌های متعددی بین سهامداران مختلف ایجاد کند. علاوه بر این، نتایج برنامه‌ریزی برای مطالعات موردی ۱ و ۳

نتایج برنامه‌ریزی برای واحدهای منابع تولید پراکنده در جداول ۴ تا ۶ ارائه شده است. همان‌طور که از این جداول مشخص است، می‌توان دریافت که ظرفیت‌های کل باتری، میکرو توربین و واحد خورشیدی برای سه مورد یکسان است، یعنی ۲۰۵۰ کیلووات ساعت باتری، ۲۹۰۰ کیلووات میکرو توربین و ۱۵۰۰ کیلووات سلول خورشیدی. واضح است که اندازه‌های بزرگ‌تر برای واحدهای میکرو توربین گازسوز در گره‌های ۷ و ۱۳ در مطالعه موردی ۲ طراحی شده‌اند، زمانی که محدودیت‌های فنی و



شکل ۵. منحنی تاب آوری سیستم را در هر دو حالت پایه (خط مشکی) و حالت پیشنهادی (خط زرد).



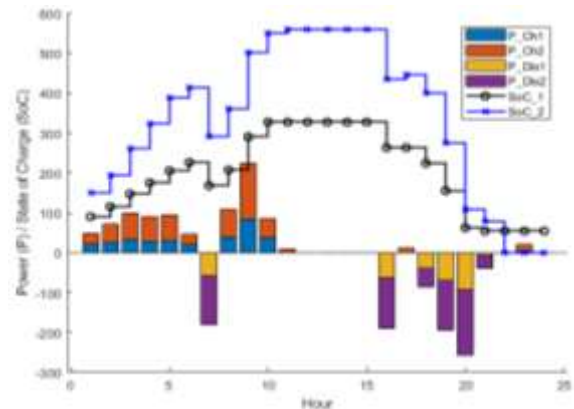
شکل ۶. فلوجارت روند کار.

۵. نتیجه گیری

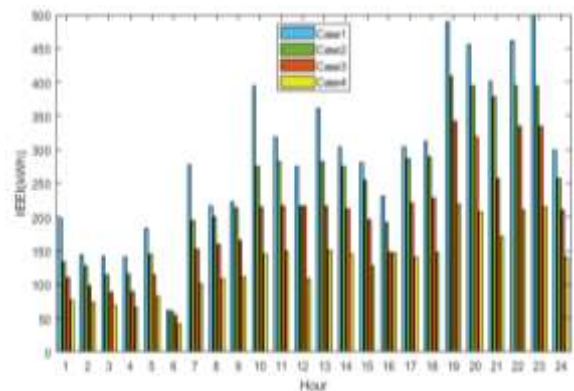
این مقاله یک چارچوب دومرحله ای مبتنی بر سناریوی احتمالاتی را ترسیم می کند که در مرحله اول، جایابی و اندازه بندی بهینه ذخیره ساز انرژی باتری، سلول های خورشیدی و میکرو توربین به گونه ای انجام می شود که استحکام و آمادگی شبکه قدرت را در برابر رویداد با تأثیر بالا تقویت می کند. سپس، در مرحله دوم، اثر تعامل متقابل حرارت و توان و بهره برداری بهینه باتری باهدف افزایش تاب آوری سیستم و کمینه کردن کل هزینه ها بررسی می شود. بر اساس نتایج شبیه سازی، روش احتمالاتی تک مرحله ای از بار محاسباتی قابل توجهی رنج می برد. در مقابل، روش پیشنهادی قادر به ارائه راه حل های بهره برداری و سرمایه گذاری

به طور قابل توجهی متفاوت است زیرا سیستم های انرژی جفت شده در مطالعه موردی ۳ در مقایسه با مطالعه موردی ۱ در نظر گرفته می شود که فقط سیستم انرژی الکتریکی در نظر گرفته می شود.

شکل (۳) برنامه ریزی زمان بندی انرژی با گرایش تاب آوری واحدهای باتری را که در مرحله برنامه ریزی اختصاص داده شده اند، نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، واحدهای باتری به گونه ای عمل می کنند که هزینه های بهره برداری را کاهش می دهند در حالی که تاب آوری سیستم را در دوره های پیک بهبودی می بخشند. این اتفاق با انتقال انرژی از ساعات کم تقاضا به ساعات پر تقاضا از طریق ذخیره انرژی در داخل واحدهای باتری با در نظر گرفتن محدودیت های ظرفیت رخ می دهد. شکل (۶) به صورت گرافیکی ارزش شاخص تاب آوری پیشنهادی را در همه مطالعات موردی نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، مطالعه موردی ۳ پایین ترین شاخص تاب آوری را دارد که نشان می دهد ساختار جفت شدگی تاب آورتر و مستحکم تر از سایر موارد است. این ناشی از انعطاف پذیری است که با جمع آوری ابزارهای انرژی مختلف ایجاد می شود. سرانجام، شکل (۵) منحنی تاب آوری سیستم را در هر دو حالت پایه (خط قرمز) و حالت پیشنهادی (مورد آبی) نشان می دهد.



شکل ۳. برنامه ریزی شارژ/دشارژ مبتنی بر تاب آوری باتری.



شکل ۴. مقدار شاخص تاب آوری پیشنهادی در مطالعات موردی مختلف.

- Energy ۲۰۲۴, ۲۹۵, ۱۳۱۱۰۵. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.energy.۲۰۲۴.۱۳۱۱۰۵
- [۱۱] Lai, K.; Illindala, M. S. "A Distributed Energy Management Strategy for Resilient Shipboard Power System"; Appl. Energy ۲۰۱۸, ۲۲۸, ۸۲۱-۸۳۲. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.apenergy.۲۰۱۸.۰۶.۱۱۱
- [۱۲] Ghaffarpour, R.; Sadi, S.; Zamanian, S.; Mahmoudian, M. "Improving Electrical Distribution Systems Resilience by Their Optimal and Adaptable Operation in the Presence of Mobile Power Sources"; Sci. J. Passive Defense ۲۰۲۳, ۱۴ (In Persian). DOR: ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۰۰۸۶۸۴۹.۱۴۰۲.۱۴.۳.۹.۳
- [۱۳] Hussian, A.; Bui, V.-H.; Kim, H.-M. "A Resilient and Privacy-Preserving Energy Management Strategy for Networked Microgrids"; IEEE Trans. Smart Grid ۲۰۱۶, ۹, ۲۱۲۷-۲۱۳۹. DOI: ۱۰.۱۱۰۹/TSG.۲۰۱۶.۲۶.۰۷۴۲۲
- [۱۴] Abedini, M.; Moazami, H. "Reconfiguration of Electricity Distribution Networks to Increase Resilience and Reliability Using Fuzzy Objective Functions and Game Theory"; Passive Defense ۲۰۲۴, ۱۵, ۲۷-۳۸ (In Persian). DOR: ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۰۰۸۶۸۴۹.۱۴۰۳.۱۵.۳.۳.۴
- [۱۵] Vatani, M. R.; Solati Alkaran, D.; Sanjari, M.; Gharehpetian, G. B. "Multiple Distributed Generation Units Allocation in Distribution Network for Loss Reduction Based on a Combination of Analytical and Genetic Algorithm Methods"; IET Gener. Transm. Distrib. ۲۰۱۶, ۱۰, ۶۶-۷۲. DOI: ۱۰.۱۰۰۴۹/iet-gtd.۲۰۱۵.۰۰.۴۱
- [۱۶] Ahrari, M.; Shirini, K.; Samadi Gharehveran, S.; Ahsae, M. G.; Haidari, S.; Anvari, P. "A Security-Constrained Robust Optimization for Energy Management of Active Distribution Networks with Presence of Energy Storage and Demand Flexibility"; J. Energy Storage ۲۰۲۴, ۸۴, ۱۱۱۰۲۴. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.est.۲۰۲۴.۱۱۱۰۲۴
- [۱۷] Zhao, L.; Jerbi, H.; Abassi, R.; Liu, B.; Latifi, M.; Nakamura, H. "Sizing Renewable Energy Systems with Energy Storage Systems Based Microgrids for Cost Minimization Using Hybrid Shuffled Frog-Leaping and Pattern Search Algorithm"; Sustain. Cities Soc. ۲۰۲۱, ۷۳, ۱۰۳۱۲۴. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.scs.۲۰۲۱.۱۰۳۱۲۴
- [۱۸] Rajabzadeh, M.; Kalantar, M. "Enhance the Resilience of Distribution System against Direct and Indirect Effects of Extreme Winds Using Battery Energy Storage Systems"; Sustain. Cities Soc. ۲۰۲۲, ۷۶, ۱۰۳۴۸۶. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.scs.۲۰۲۱.۱۰۳۴۸۶
- [۱۹] Zadehbagheri, M.; Abassi, M. A.; Kiani, M. "Finding the Optimal Size and Placement for the Sources of Distributed Generation (DG) and Capacitors in the Distribution Networks by Microgrid Segmentation with a Passive Defense Approach"; Passive Defense ۲۰۲۳, ۱۴, ۱-۱۴ (In Persian). DOR: ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۰۰۸۶۸۴۹.۱۴۰۲.۱۴.۲.۱.۳
- [۲۰] Oskouei, A. G.; Abdolmaleki, N.; Bouyer, A.; Arasteh, B.; Shirini, K. "Efficient Superpixel-Based Brain MRI Segmentation Using Multi-Scale Morphological Gradient Reconstruction and Quantum Clustering"; Biomed. Signal Process. Control ۲۰۲۵, ۱۰۰, ۱۰۷۰۶۳. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.bspc.۲۰۲۴.۱۰۷۰۶۳
- [۲۱] Shirini, K.; Aghdasi, H. S.; Saeedvand, S. "Modified Imperialist Competitive Algorithm for Aircraft Landing Scheduling Problem"; J. Supercomput. ۲۰۲۴, ۸۰, ۱۳۷۸۱-۱۳۸۱۲. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۲۲۷-۰۲۴-۰۵۹۹۹-w
- [۲۲] Shirini, K.; Aghdasi, H. S.; Saeedvand, S. "A Comprehensive Survey on Multiple-Runway Aircraft Landing Optimization Problem"; Int. J. Aeronaut. Space Sci. ۲۰۲۴, ۲۵(۴), ۱۵۷۴-۱۶۰۲. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۴۲۴۰۵۰۲۴-۰۰۷۴۷-z
- [۲۳] [۲۳] Shirini, K.; Aghdasi, H. S.; Saeedvand, S. "Multi-Objective Aircraft Landing Problem: A Multi-Population
- بهینه از دیدگاه یکپارچگی است که راهنمایی ارزشمندی برای برنامه‌ریزی گرایش تاب‌آوری میکروگریدهای چند انرژی است. بر اساس نتایج، یافته‌های زیر می‌تواند حاصل شود:
- برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای راه‌حل واقع‌بینانه و کارآمدی را در شرایط نامطمئن ارائه می‌دهد.
 - واحدهای ذخیره‌سازی انرژی می‌توانند نقش کلیدی در افزایش تاب‌آوری سیستم ایفا کنند.
 - در نظر گرفتن سیستم‌های انرژی مختلف انعطاف‌پذیری کل سیستم را برای مقابله مؤثر با رویدادهای شدید پیش‌بینی شده افزایش می‌دهد.
- ### ۵. مراجع‌ها
- [۱] Zhao, P.; Cao, Z.; Dajun Zeng, D.; Wang, Z.; Chen, X.; Yan, X. "Cyber Resilient Multi-Energy Management for Complex Systems"; IEEE Trans. Ind. Inform. ۲۰۲۱, ۱۸, ۲۱۴۴-۲۱۵۹. DOI: ۱۰.۱۱۰۹/TII.۲۰۲۱.۳۰۹۷۷۶۰
- [۲] Lai, K.; Illindala, M. S. "A Distributed Energy Management Strategy for Resilient Shipboard Power Systems"; Appl. Energy ۲۰۱۸, ۲۲۸, ۸۲۱-۸۳۲. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.apenergy.۲۰۱۸.۰۲.۲۰۳
- [۳] Panteli, M.; Mancarella, P. "The Grid: Stronger, Bigger, Smarter? Presenting a Conceptual Framework of Power System Resilience"; IEEE Power Energy Mag. ۲۰۱۵, ۱۳, ۵۸-۶۶. DOI: ۱۰.۱۱۰۹/MPE.۲۰۱۵.۲۳۹۷۳۴
- [۴] Mirsadeghi, M.; Ghaffarpour, R. "Improving the Resilience of Power Grids in the Face of Focused Attacks Using the Contingency Analysis"; Passive Defense ۲۰۲۲, ۱۳, ۱-۱۰ (In Persian). DOR: ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۰۰۸۶۸۴۹.۱۴۰۱.۱۳.۳.۱.۸
- [۵] Gazijahani, F.; Salehi, J.; Shafie-Khah, M. "Benefiting from Energy-Hub Flexibilities to Reinforce Distribution System Resilience: A Pre- and Post-Disaster Management Model"; IEEE Syst. J. ۲۰۲۲, ۱۶, ۲۳۸۱-۲۳۹۰. DOI: ۱۰.۱۱۰۹/JSYST.۲۰۲۲.۳۱۴۷۰۷۵
- [۶] Abdeltawab, H. H.; Mohamed, Y. A. "Mobile Energy Storage Scheduling and Operation in Active Distribution Systems"; IEEE Trans. Ind. Electron. ۲۰۱۷, ۶۴, ۶۸۲۸-۶۸۴۰. DOI: ۱۰.۱۱۰۹/TIE.۲۰۱۷.۲۶۸۲۷۷۹
- [۷] Ni, F.; et al. "Enhancing Resilience of DC Microgrids With Model Predictive Control Based Hybrid Energy Storage System"; Int. J. Electr. Power Energy Syst. ۲۰۲۱, ۱۲۸, ۱۰۶۷۳۸. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.ijepes.۲۰۲۰.۱۰۶۷۳۸
- [۸] Karimi Saiedabadi, A.; Mozafari, B.; Soleymani, S.; Mohammadnezhad Shourkaei, H. "Optimal Operation of the Water-Energy Supply System in an Islanded Microgrid with Several Energy Carriers to Improve Resilience Against Cyber Attacks"; Passive Defense ۲۰۲۳, ۱۳, ۱-۱۰ (In Persian). DOR: ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۰۰۸۶۸۴۹.۱۴۰۱.۱۳.۴.۱.۰
- [۹] Ogunjuyigbe, A. S. O.; Ayodele, T. R.; Akinola, O. A. "Optimal Allocation and Sizing of PV/Wind/Split-Diesel/Battery Hybrid Energy System for Minimizing Life Cycle Cost, Carbon Emission and Dump Energy of Remote Residential Building"; Appl. Energy ۲۰۱۶, ۱۷۱, ۱۵۳-۱۷۱. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.apenergy.۲۰۱۶.۰۳.۰۴۸
- [۱۰] Li, K.; Yin, M.; Yu, J.; Yang, Z.; Li, Y. "Transportable Energy Storage Assisted Post-Disaster Restoration of Distribution Networks with Renewable Generations";

- [۲۶] Taherihajivand, A.; Shirini, K.; Gharehveran, S. S. "Weed Detection in Fields Using Convolutional Neural Network Based on Deep Learning"; *Agric. Eng.* ۲۰۲۴, ۴۷(۱), ۱۲۹–۱۴۲ (In Persian). DOI: ۱۰.۲۲۰۵۵/agen.۲۰۲۴.۴۵۳۲۷.۱۶۸۸
- [۲۷] Shirini, K.; Kordan, M. B.; Samadi Gharehveran, S. "Impact of Learning Rate and Epochs on LSTM Model Performance: A Study of Chlorophyll-a Concentrations in the Marmara Sea"; *J. Supercomput.* ۲۰۲۵, ۸۱(۱), ۱–۱۸. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۲۲۷-۰۲۴-۰۶۸۰۶-۲
- [۲۸] Samadi Gharehveran, S.; Shirini, K.; Khavar, S. C.; Mousavi, S. H.; Abdolahi, A. "Deep Learning-Based Demand Response for Short-Term Operation of Renewable-Based Microgrids"; *J. Supercomput.* ۲۰۲۴, ۸۰, ۲۶۰۰۲–۲۶۰۳۵. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۲۲۷-۰۲۴-۰۶۴۰۷-Z
- Solution Based on Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II"; *J. Supercomput.* ۲۰۲۴, ۸۰, ۲۵۲۸۳–۲۵۳۱۴. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۲۲۷-۰۲۴-۰۶۳۸۵-۲
- [۲۹] Samadi Gharehveran, S.; Ghassemzadeh, S.; Rostami, N. "Two-Stage Resilience-Constrained Planning of Coupled Multi-Energy Microgrids in the Presence of Battery Energy Storages"; *Sustain. Cities Soc.* ۲۰۲۲, ۸۳, ۱۰۳۹۵۲. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.scs.۲۰۲۲.۱۰۳۹۵۲
- [۳۰] Samadi Gharehveran, S.; Zadeh, S. G.; Rostami, N. "Resilience-Oriented Planning and Pre-Positioning of Vehicle-Mounted Energy Storage Facilities in Community Microgrids"; *J. Energy Storage* ۲۰۲۳, ۷۲, ۱۰۸۲۶۳. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.est.۲۰۲۳.۱۰۸۲۶۳