Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 3 – Autumn 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Resilience and Flexibility Coordination in VPP-Based Multi-Agent Microgrids via a Multi-Layer Framework

Hamed Neyahosseini[1], *Ph.D. Student*, Afshin Lashkarara[* 2], *Associate Professor*, Hajar Bagheri Tolabi[3], *Assistant Professor*

[1] Department of Electrical Engineering, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran, hamed.neyahosseini@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 integration of Distributed Energy Resources (DERs) into multi-agent microgrids coordinated through Virtual Power Plants (VPPs) plays a vital role in enhancing the resilience and flexibility of modern distribution networks. However, the stochastic nature of renewable energy sources, dynamic load variations, and the complexity of coordinating autonomous agents necessitate advanced frameworks capable of effectively managing multi-objective, nonlinear, and uncertain problems. This study proposes a novel multi-layer coordination framework to synchronize resilience and flexibility in VPP-based multi-agent microgrids, which facilitates real-time information and resource exchange among agents. Furthermore, three new quantitative indices are introduced: the Resilience Coordination Index (RCI), the Flexibility Coordination Index (FCI), and the Multi-Agent Coordination Index (MCI), which evaluate system performance from an inter-agent coordination perspective. To solve the optimization problem, the Homeostatic Particle Swarm Optimization (HPSO) algorithm is employed. The proposed framework is evaluated on an IEEE 85-bus test system comprising three microgrids and diverse resources, including photovoltaic units, wind turbines, battery energy storage systems (BESS), microturbines, fuel cells, and electric vehicles. Simulation results demonstrate that the proposed framework reduces operational costs by 13.05%, completely eliminates the Expected Energy Not Supplied (EENS) under fault conditions, and maintains bus voltages above 0.884 p.u. The RCI, FCI, and MCI indices reach values of 100.0%, 47.5%, and 51.8%, respectively, highlighting the significant superiority of the multi-agent framework over centralized and uncoordinated approaches. Sensitivity analysis confirms the robustness of the proposed framework under diverse operational conditions.

Keywords: Multi-agent microgrid, Virtual Power Plant (VPP), Resilience-flexibility coordination, Multi-layer framework, Distributed Energy Resources (DERs), Multi-Agent Systems (MAS).

Received: 13 Sep. 2025
Revised: 11 Nov. 2025
Accepted: 29 Nov. 2025

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

Citation: H. Neyahosseini, A. Lashkarara, H. Bagheri Tolabi, "Resilience and Flexibility Coordination in VPP-Based Multi-Agent Microgrids via a Multi-Layer Framework", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 3, pp. 81-99, December 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.559]

مقاله پژوهشی

هماهنگی تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری در ریزشبکه‌های چندعامله مبتنی بر نیروگاه مجازی با چارچوب چندلایه‌ای

حامد نیاحسینی[۱]، دانشجوی دکتری، افشین لشکرآرا[۲]، دانشیار، هاجر باقری طولابی[۳]، استادیار

۱- گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، hamed.neyahosseini@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: ادغام منابع انرژی توزیع‌شده (DERs) در ریزشبکه‌های چندعامله که از طریق نیروگاه‌های مجازی (VPPs) هماهنگ شده‌اند، نقشی حیاتی در ارتقای تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری شبکه‌های توزیع مدرن ایفا می‌کند. با این حال، ماهیت تصادفی منابع تجدیدپذیر، تغییرات پویای بار و پیچیدگی هماهنگی بین عامل‌های خودمختار، نیازمند چارچوب‌های پیشرفته‌ای است که قادر به مدیریت مؤثر مسائل چندهدفه، غیرخطی و دارای عدم قطعیت باشند. این پژوهش یک چارچوب هماهنگی چندلایه‌ای نوین را برای هماهنگ‌سازی تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری در ریزشبکه‌های چندعامله مبتنی بر VPP ارائه می‌دهد. که امکان تبادل اطلاعات و منابع بین عامل‌ها را به صورت بلادرنگ فراهم می‌سازد. علاوه بر این، سه شاخص کمی جدید شامل شاخص هماهنگی تاب‌آوری (RCI)، شاخص هماهنگی انعطاف‌پذیری (FCI) و شاخص هماهنگی چندعاملی (MCI) معرفی شده‌اند که عملکرد سیستم را از منظر هماهنگی بین‌عاملی ارزیابی می‌کنند. برای حل مسئله بهینه‌سازی، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات هموستاتیک (HPSO) استفاده شده است. چارچوب پیشنهادی بر روی یک سیستم آزمون IEEE 85 شینه که شامل سه ریزشبکه و منابع متنوع از جمله واحدهای فتوولتائیک، توربین‌های بادی، ذخیره‌ساز باتری، میکروتوربین‌ها، پیل‌های سوختی و خودروهای الکتریکی است، ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی هزینه‌های عملیاتی را تا ۱۳،۰۵ درصد کاهش می‌دهد، شاخص انرژی مورد انتظار تأمین‌نشده (EENS) را در شرایط خطا به طور کامل حذف می‌کند و ولتاژ شینه‌ها را بالای ۰،۸۸۴ پریونیت حفظ می‌نماید. شاخص‌های RCI، FCI و MCI به ترتیب به مقادیر ۱۰۰،۰٪، ۴۷،۵٪ و ۵۱،۸٪ می‌رسند که برتری قابل توجه چارچوب چندعاملی را نسبت به رویکردهای متمرکز و غیرهماهنگ نشان می‌دهد. تحلیل حساسیت، استحکام چارچوب پیشنهادی را در شرایط عملیاتی متنوع تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: ریزشبکه چندعامله، نیروگاه مجازی، هماهنگی تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری، چارچوب چندلایه‌ای، منابع انرژی توزیع‌شده، سیستم‌های چندعاملی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۲۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۸/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۸

* **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 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

فهرست علائم و پارامترها

الف) اندیس‌ها و مجموعه‌های مدل(Indices and Sets)

شرح فارسی	شرح انگلیسی	نماد
اندیس دوره زمانی (ساعت)	Time period index	t
اندیس ریزشبکه یا عامل VPP	Microgrid/VPP agent index	i, j
اندیس شین در شبکه توزیع	Bus index in distribution network	k, m, n
اندیس سناریوی عدم قطعیت	Uncertainty scenario index	s

ب) پارامترهای مدل(Model Parameters)

شرح فارسی	شرح انگلیسی	واحد	نماد
توان در شرایط استاندارد آزمون	PV power at standard test conditions	kW	P
تابش خورشیدی استاندارد	Standard solar irradiance	W/m²	G
دمای عملکرد نرمال سلول	Nominal operating cell temperature	°C	T
ضریب دمایی توان	Temperature coefficient of power	%/°C	γ
راندمان اینورتر	Inverter efficiency	p.u.	η
سرعت باد توربین	Wind turbine cut-in speed	m/s	V
ضرایب تابع هزینه درجه دوم	Cost function coefficients (quadratic)	\$, \$/kW, \$/kW²	a, b, c
ظرفیت اسمی باتری	Battery nominal capacity	kWh	E
حدود حداقل/حداکثر حالت شارژ	Min/max state of charge limits	p.u.	$SOCmax,min$
راندمان شارژ/دشارژ	Charging/discharging efficiency	p.u.	$\eta,$
نرخ خودتخلیه باتری	Battery self-discharge rate	1/h	δ
قیمت برق خریداری‌شده از شبکه بالادست	Electricity price from upstream grid	\$/kWh	C
ولتاژ نامی سیستم	Nominal system voltage (1.0 p.u.)	p.u.	V
مقاومت خط بین شین i و j	Resistance of line i-j	Ω	R
ضرایب وزنی تابع هدف چندهدفه	Weight coefficients of objective function	p.u.	w
ضرایب وزنی شاخص MCI	Weight coefficients of MCI index	p.u.	γ

۱- مقدمه

۱-۱- بیان مسئله و ضرورت پژوهش

سیستم‌های قدرت مدرن با گذار از ساختارهای متمرکز سنتی به سمت شبکه‌های هوشمند توزیع‌شده، با چالش‌های بی‌سابقه‌ای روبرو هستند. افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر[۱] (RESs) نظیر انرژی خورشیدی و بادی، اگرچه گامی ضروری برای کاهش انتشار کربن و پایداری زیست‌محیطی است، اما ماهیت متناوب و غیرقابل پیش‌بینی این منابع، پایداری و قابلیت اطمینان شبکه توزیع را تحت تأثیر قرار داده است [۱]. در این میان، ریزشبکه‌ها[۲](MG) به عنوان بلوک‌های سازنده شبکه‌های هوشمند، قابلیت عملکرد جزیره‌ای و متصل به شبکه را فراهم می‌کنند. با این حال، مدیریت بهینه تعداد زیادی از منابع انرژی توزیع‌شده[۳] (DERs) پراکنده در سطح شبکه توزیع، نیازمند یک لایه هماهنگ‌کننده هوشمند است. نیروگاه مجازی[۴] (VPP) به عنوان یک موجودیت نرم‌افزاری تعریف می‌شود که وظیفه تجمیع، پایش و کنترل مجموعه‌ای از منابع انرژی توزیع‌شده را بر عهده دارد [۲]. با این

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

حال، در شبکه‌های بزرگ با چندین ریزشبکه، مدیریت متمرکز یک VPP واحد با چالش‌های مقیاس‌پذیری و تأخیر ارتباطی روبرو است. در این راستا، سیستم‌های چندعاملی[۵] (MAS) به عنوان راهکاری نوین برای مدیریت توزیع‌شده منابع مطرح شده‌اند[۳]. یکی از چالش‌های اصلی در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت مدرن، مقابله با حوادث غیرمترقبه نظیر بلایای طبیعی، حملات سایبری-فیزیکی و خرابی‌های تجهیزات است. در این راستا، مفهوم تاب‌آوری[۶] به عنوان توانایی سیستم برای پیش‌بینی، جذب، بازیابی و تطبیق با شرایط اختلال‌زا، اهمیت ویژه‌ای یافته است [۴]. از سوی دیگر، با توجه به نوسانات سریع تولید و مصرف، مفهوم انعطاف‌پذیری[۷] نیز به عنوان توانایی سیستم برای پاسخگویی به تغییرات ناگهانی و حفظ تعادل توان در بازه‌های زمانی کوتاه، مطرح شده است[۵]. هماهنگ‌سازی همزمان تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری در ریزشبکه‌های چندعامله مبتنی بر VPP، یک مسئله پیچیده بهینه‌سازی چندهدفه است که نیازمند چارچوب‌های پیشرفته هماهنگی می‌باشد. چالش اصلی در این زمینه، طراحی پروتکل‌هایی است که: امکان تبادل اطلاعات بلادرنگ بین عامل‌های VPP را فراهم کنند، تخصیص بهینه منابع بین ریزشبکه‌ها را در شرایط عادی و بحرانی ممکن سازند و تعادل اقتصادی-فنی بین اهداف تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری را برقرار کنند.

۲- مرور ادبیات موضوع

۲-۱- سیستم‌های چندعاملی در شبکه‌های هوشمند

سیستم‌های چندعاملی به عنوان یک پارادایم محاسباتی نوین، امکان حل مسائل پیچیده از طریق تعامل خودمختارانه عامل‌های هوشمند را فراهم می‌سازند. در حوزه سیستم‌های قدرت، MASها برای مدیریت توزیع‌شده منابع، کنترل بار، و بهینه‌سازی انرژی به کار گرفته شده‌اند [۶]. نیک مهر و روان‌دانه‌گر (۲۰۱۵) یک رویکرد چندعاملی برای برنامه‌ریزی توان بهینه در ریزشبکه‌های چندگانه پیشنهاد کردند که قابلیت مقیاس‌پذیری بالایی داشت [۷]. با این حال، اکثر مطالعات موجود بر روی جنبه‌های اقتصادی یا فنی به صورت مجزا تمرکز کرده‌اند و کمتر به هماهنگی همزمان تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری پرداخته‌اند.

۲-۲- تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری در ریزشبکه‌ها

تاب‌آوری سیستم قدرت معمولاً با شاخص‌هایی نظیر انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار[۸] (EENS)، مدت زمان خاموشی[۹] (SAIDI) و تعداد خاموشی‌ها[۱۰] (SAIFI) سنجیده می‌شود [۸]. پانتلی و مانکارلا (۲۰۱۵) چارچوبی مفهومی برای تاب‌آوری ارائه دادند که شامل چهار مرحله مقاومت، جذب، بازیابی و تطبیق است [۹]. در همین راستا، گیلانی و همکاران (۲۰۲۰) با ارائه یک استراتژی مبتنی بر تشکیل ریز شبکه‌های پویا، نشان دادند که بازپیکربندی خودکار توپولوژی شبکه با درنظرگیری منابع انرژی توزیع‌شده می‌تواند زمان بازیابی سیستم را پس از وقوع خطا تا ۴۰٪ کاهش دهد و شاخص EENS را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد [۱۰]. انعطاف‌پذیری نیز به‌عنوان توانایی سیستم در حفظ تعادل توان تحت تغییرات سریع تعریف می شود [۱۱]. ژو و همکاران (۲۰۲۵) با توسعه یک چارچوب بهینه سازی چندهدفه تصادفی مبتنی بر قیود شانس مشترک، هماهنگی بهینه بین ذخیره سازی انرژی و رزرو چرخشی را برای شبکه‌های توزیع مجهز به تجمیع‌کنندگان منابع انعطاف‌پذیر مدل‌سازی کردند که قابلیت اطمینان سیستم را در شرایط عدم قطعیت شدید بهبود می‌بخشد [۱۲]. با این حال، شکاف اصلی در ادبیات موضوع، عدم وجود یک چارچوب یکپارچه برای هماهنگی هم‌زمان تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری در سطح چندعاملی است. اکثر مطالعات موجود یا بر روی تاب‌آوری [۱۳، ۱۴] یا بر روی انعطاف‌پذیری [۱۵، ۱۶] تمرکز کرده‌اند و کمتر به تعامل این دو مفهوم در یک چارچوب چندعاملی پرداخته‌اند.

۲-۳- نیروگاه‌های مجازی و هماهنگی چندعاملی

نیروگاه مجازی (VPP) به عنوان یک موجودیت نرم‌افزاری، وظیفه تجمیع و کنترل منابع انرژی توزیع‌شده را بر عهده دارد [۱۷]. در چارچوب چندعاملی، هر VPP به عنوان یک عامل هوشمند عمل می‌کند که قادر به تصمیم‌گیری مستقل و هماهنگی با سایر عامل‌ها است. سارمینتو و همکاران (۲۰۲۴) انعطاف‌پذیری عملیاتی VPPها را برای تسهیل ادغام DERها مورد بررسی قرار

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

دادند [۱۸]. منگ و ژانگ (۲۰۲۳) استراتژی بازیابی VPP را با بهبود تاب‌آوری پیشنهاد کردند [۱۹]. با این حال، این مطالعات عمدتاً بر روی VPPهای منفرد تمرکز دارند و کمتر به تعامل چندعاملی بین چندین VPP می‌پردازند.

۲-۴- نوآوری و اهداف پژوهش

این پژوهش با هدف پر کردن شکاف موجود در ادبیات موضوع، یک چارچوب هماهنگی چندلایه‌ای نوین برای ریزشبکه‌های چندعامله مبتنی بر VPP ارائه می‌دهد. نوآوری‌های اصلی این پژوهش عبارتند از:

۲-۴-۱- چارچوب هماهنگی چندلایه‌ای[۱۱]:

طراحی یک معماری سه‌لایه شامل لایه هماهنگی مرکزی، لایه عامل‌های VPP و لایه منابع فیزیکی که امکان مدیریت سلسله‌مراتبی و توزیع‌شده را فراهم می‌سازد.

۲-۴-۲- سه پروتکل هماهنگی نوین:

پروتکل هماهنگی تاب‌آوری[۱۲] (RCP): تبادل اطلاعات وضعیت و تخصیص منابع اضطراری بین عامل‌ها

پروتکل هماهنگی انعطاف‌پذیری[۱۳] (FCP): تبادل ظرفیت رزرو و بهینه‌سازی زمان‌بندی منابع انعطاف‌پذیر

پروتکل هماهنگی اقتصادی[۱۴] (ECP): مبادلات انرژی[۱۵] P2P و قیمت‌گذاری پویا بین ریزشبکه‌ها

۲-۴-۳- سه شاخص کمی جدید:

شاخص هماهنگی تاب‌آوری[۱۶] (RCI): ارزیابی تاب‌آوری سیستم با در نظر گرفتن حمایت متقابل بین ریزشبکه‌ها

شاخص هماهنگی انعطاف‌پذیری[۱۷] (FCI): سنجش انعطاف‌پذیری تجمعی با تأکید بر هماهنگی منابع

شاخص هماهنگی چندعاملی[۱۸] (MCI): تلفیق شاخص‌های RCI و FCI با زمان هماهنگی

۲-۴-۴- ارزیابی جامع بر روی سیستم IEEE 85 شینه:

ارزیابی عملکرد چارچوب پیشنهادی بر روی یک سیستم آزمون بزرگ مقیاس با سه ریزشبکه و منابع متنوع.

ساختار این مقاله به گونه‌ای تنظیم شده است که در بخش دوم به مرور ادبیات موضوع پرداخته شود. بخش سوم به فرمول‌بندی ریاضی مسئله شامل مدل‌سازی تجهیزات، چارچوب چندعاملی و توابع هدف اختصاص دارد. بخش چهارم پروتکل‌های هماهنگی و شاخص‌های پیشنهادی را تشریح می‌کند. بخش پنجم به ارائه نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها می‌پردازد و در نهایت بخش ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی را ارائه می‌دهد.

۳- فرمول بندی مسئله

۳-۱- ساختار کلی سیستم و چارچوب چندعاملی

سیستم مورد مطالعه در این پژوهش، یک شبکه توزیع شعاعی اصلاح‌شده IEEE 85 شینه است که به سه ریزشبکه (MG) تقسیم شده است. هر ریزشبکه تحت کنترل یک عامل نیروگاه مجازی[۱۹] قرار دارد. این عامل‌ها مسئولیت مدیریت منابع تولیدی، ذخیره‌سازها و بارهای قابل کنترل در محدوده جغرافیایی خود را بر عهده دارند.

۳-۲- مدل سازی منابع انرژی توزیع شده

در این بخش، مدل‌های ریاضی جامع برای تمام انواع منابع موجود در ریزشبکه‌ها شامل سیستم‌های فتوولتائیک[۲۰] (PV)، توربین‌های بادی[۲۱] (WT)، واحدهای قابل کنترل مانند میکروتوربین‌ها[۲۲] (MT) و پیل‌های سوختی[۲۳] (FC) و همچنین سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی[۲۴] (BESS)وخودرو الکتریکی[۲۵] (EV) ارائه می‌شود. این مدل‌ها نه تنها رفتار فنی و عملیاتی هر منبع را تحت شرایط مختلف در نظر می‌گیرند، بلکه محدودیت‌های فیزیکی، فنی و اقتصادی آنها را نیز لحاظ می‌کنند. علاوه بر این، عدم قطعیت ذاتی منابع تجدیدپذیر (فتوولتائیک وبادی) و بارهای شبکه با رویکرد احتمالاتی مدل‌سازی شده است تا نتایج

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

حاصله از چارچوب پیشنهادی، قابلیت تعمیم‌پذیری بالاتری به شرایط واقعی عملیاتی داشته باشد. مدل‌های ارائه‌شده، پایه و اساس فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی را تشکیل می‌دهند.

الف) مدل‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک (PV):

توان خروجی پنل‌های خورشیدی تابعی از تابش خورشید و دمای محیط است. رابطه حاکم بر توان خروجی به صورت زیر است:

$$T_c = T_a + G \cdot \frac{T_{NOC} - 20}{0.8} \quad (۱)$$

$$P_c = P_{STC} \cdot \left[1 + \gamma \cdot (T_c - 25)\right] \cdot \frac{G}{G_{STC}} \quad (۲)$$

$$P_{PV}(t) = n_{cell} \cdot P_c \cdot \eta_{inv} \quad (۳)$$

که در آن T_c دمای سلول، T_a دمای محیط، G تابش خورشیدی، T_{NOC} دمای عملکرد نرمال سلول، P_{STC} توان در شرایط استاندارد آزمون، γ ضریب دمایی توان، G_{STC} تابش استانداردW/m^2 ۱۰۰۰، n_{cell} تعداد سلول‌ها و η_{inv} راندمان اینورتر است. عدم قطعیت در تابش خورشید با استفاده از توزیع بتا با انحراف معیار ۱۰ درصد مدل‌سازی شده است[۲۰].

ب) مدل‌سازی توربین‌های بادی (WT):

توان خروجی توربین بادی به سرعت باد وابسته است و توسط منحنی توان سازنده تعیین می‌شود. رابطه زیر برای محاسبه توان استفاده می‌شود:

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & V(t) < V_{cut-in} \text{ íÇ } V(t) \geq V_{cut-off} \\ P_{rated} \cdot \left[\dfrac{V(t) - V_{cut-in}}{V_{rated} - V_{cut-in}}\right]^3 & V_{cut-in} \leq V(t) < V_{rated} \\ P_{rated} & V_{rated} \leq V(t) < V_{cut-off} \end{cases} \quad (۴)$$

در مدل‌سازی توربین‌های بادی، $P_{WT}(t)$توان خروجی توربین در ساعت t بر حسب کیلووات، $V(t)$سرعت باد لحظه‌ای در ارتفاع هاب توربین بر حسب متر بر ثانیه، $V_{cut\text{-}in}$سرعت باد قطع به کار (سرعت حداقل لازم برای شروع تولید توان)، V_{rated}سرعت باد نامی (سرعتی که توربین توان اسمی خود را تولید می‌کند)، $V_{cut\text{-}off}$سرعت باد قطع از کار (سرعت حداکثر ایمن برای حفاظت از توربین) و P_{rated} توان نامی توربین بادی بر حسب کیلووات است. این مدل رفتار غیرخطی توربین را در سه ناحیه عملیاتی مختلف به دقت توصیف می‌کند[۲۰]. عدم قطعیت سرعت باد با توزیع ویبول با پارامترهای شکل $k=2$ و مقیاس $\lambda=8$ مدل‌سازی شده است.

ج) مدل‌سازی میکروتوربین‌ها (MT) **و پیل‌های سوختی** (FC):

این منابع به عنوان تولیدات قابل کنترل[۲۶] در نظر گرفته می‌شوند. محدودیت‌های نرخ تغییر توان[۲۷] و همچنین حدود حداقل و حداکثر توان تولیدی برای آن‌ها اعمال می‌شود:

$$P_{MT/FC}^{min} \leq P_{MT/FC}(t) \leq P_{MT/FC}^{max} \quad \text{و} \quad |P_{MT/FC}(t) - P_{MT/FC}(t-1)| \leq R_{MT/FC}^{max} \quad (۵)$$

هزینه عملیاتی این منابع تابعی از سوخت مصرفی است که به صورت درجه دوم مدل‌سازی شده است:

$$C_{MT/FC}(t) = a \cdot P_{MT/FC}^2(t) + b \cdot P_{MT/FC}(t) + c \quad (۶)$$

در مدل‌سازی میکروتوربین‌ها و پیل‌های سوختی، $P_{MT/FC}(t)$توان خروجی واحد در ساعت t بر حسب کیلووات، $P_{min}^{MT/FC}$ و $P_{max}^{MT/FC}$ به ترتیب حداقل و حداکثر توان تولیدی مجاز واحد، $R_{max}^{MT/FC}$ حداکثر نرخ تغییر توان[۲۸] بر حسب کیلووات در

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

ساعت که محدودیت دینامیکی واحد را نشان می‌دهد، $C_{MT/FC}(t)$ هزینه عملیاتی واحد در ساعت t ، a ضریب درجه دوم تابع هزینه، b ضریب درجه اول و c هزینه ثابت واحد (شامل هزینه‌های بهره بردار و نگهداری) هستند[۲۰] و [۲۱].

د) مدل‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی BESS) **و** EV):

دینامیک حالت شارژ[۲۹] (SOC) باتری‌ها با معادله زیر توصیف می‌شود:

$$SOC(t+1) = SOC(t)\cdot(1-\Delta) + \frac{P_{ch}(t)\cdot\eta_{ch} - P_{dis}(t)/\eta_{dis}}{E_{cap}}\cdot\Delta t \qquad (۷)$$

در مدل‌سازی باتری‌های ذخیره‌سازی و خودروهای الکتریکی، $SOC(t)$ حالت شارژ باتری در ساعت t (مقدار بین صفر و یک)، $Ecap$ ظرفیت اسمی باتری بر حسب کیلووات‌ساعت، $P_{ch}(t)$ توان شارژ باتری در ساعت t بر حسب کیلووات، $P_{dis}(t)$ توان دشارژ باتری در ساعت t بر حسب کیلووات، η_{ch} راندمان شارژ، η_{dis} راندمان دشارژ، Δ نرخ خودتخلیه باتری در هر ساعت و Δt گام زمانی شبیه‌سازی (معمولاً یک ساعت) است. راندمان رفت‌وبرگشتی باتری نیز برابر ۰,۹۲۷ در نظر گرفته شده است[۲۱] ، [۲۲].

راندمان دوره‌ای کل:

$$\eta_{battery} = \eta_{ch}\times\eta_{dis} = 0.927 \qquad (۸)$$

برای خودروهای الکتریکی، قیود اضافی نظیر زمان اتصال به شبکه و سطح شارژ مورد نیاز هنگام خروج[۳۰] نیز اعمال می‌گردد:

$$SOC_{EV}^{min} \le SOC_{EV}(t) \le SOC_{EV}^{max} \quad و \quad SOC_{EV}(t_{dep}) = SOC_{EV}^{dep} \qquad (۹)$$

قیود بهینه‌سازی:

تعادل توان در هر ریزشبکه و هر گام زمانی:

$$\sum_{i\in \mathrm{DER}_j} P_{i,j}(t) + P_{\mathrm{grid},j}(t) + \sum_{k\neq j} P_{k\to j}(t) = P_{\mathrm{load},j}(t) + P_{\mathrm{loss},j}(t) \qquad (۱۰)$$

حدود توان و نرخ تغییر[۳۱] منابع قابل کنترل:

$$P_{\mathrm{MT/FC},j}^{\min} \le P_{\mathrm{MT/FC},j}(t) \le P_{\mathrm{MT/FC},j}^{\max} \quad \left|P_{\mathrm{MT/FC},j}(t) - P_{\mathrm{MT/FC},j}(t-1)\right| \le R_{\mathrm{MT/FC},j}^{\max} \qquad (۱۱)$$

دینامیک ذخیره‌سازها و قیود SOC:

$$\mathrm{SOC}_j^{\min} \le \mathrm{SOC}_j(t) \le \mathrm{SOC}_j^{\max} \qquad (۱۲)$$

جلوگیری از شارژ/دشارژ همزمان:

$$P_{\mathrm{ch},j}(t)\cdot P_{\mathrm{dis},j}(t) = 0 \qquad (۱۳)$$

قیود شبکه (ولتاژ و جریان شاخه‌ها):

$$V_j^{\min} \le \left|V_j(t)\right| \le V_j^{\max}, \quad I_{ij}(t) \le I_{ij}^{\max} \qquad (۱۴)$$

۴- پروتکل‌های هماهنگی و شاخص‌های پیشنهادی:

۴-۱- پروتکل هماهنگی تاب‌آوری(RCP) :

این پروتکل امکان تبادل اطلاعات وضعیت و تخصیص منابع اضطراری بین عامل‌های VPP را فراهم می‌سازدکه بدین صورت می باشد.

مرحله ۱ — تشخیص وضعیت اضطراری :هر عامل VPP به صورت مستمر وضعیت شبکه خود را پایش می‌کند. در صورت وقوع خطا (قطع شبکه بالادست، خرابی تجهیزات، کاهش شدید تولید تجدیدپذیر)، عامل وضعیت اضطراری را تشخیص می‌دهد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

مرحله ۲ — اعلام نیاز به حمایت :عامل آسیب‌دیده یک پیام درخواست حمایت[۳۲] به سایر عامل‌ها ارسال می‌کند:

$$HR_j = \{P_{\text{deficit},j}, t_{\text{expected},j}, \text{Priority}_j\} \quad (۱۵)$$

مرحله ۳ — ارزیابی ظرفیت حمایت: هر عامل سالم ظرفیت حمایت خود را ارزیابی می‌کند:

$$P_{support,i}^{max} = \min(P_{MT,i}^{avail} + P_{FC,i}^{avail} + P_{BESS,i}^{dis,max} + P_{EV,i}^{V2G,max}, P_{trans,i,j}^{max}) \quad (۱۶)$$

مرحله ۴ — تخصیص بهینه منابع: لایه هماهنگی مرکزی با استفاده از الگوریتم HPSO، تخصیص منابع بین عامل‌ها را بهینه‌سازی می‌کند:

$$\min \sum_{j=1}^{N_{MG}} \sum_{i=1,i\neq j}^{N_{MG}} C_{trans,i,j} \cdot P_{support,i,j} \quad (۱۷)$$

محدود به:

$$\sum_{i=1,i\neq j}^{N_{MG}} P_{support,i,j} \geq P_{deficit,j} \quad (۱۸)$$

۴-۲- پروتکل هماهنگی انعطاف‌پذیری (FCP):

این پروتکل امکان تبادل ظرفیت رزرو و بهینه‌سازی زمان‌بندی منابع انعطاف‌پذیر بین ریزشبکه‌ها را فراهم می‌سازد.

مرحله ۱ — پیش‌بینی نوسانات: هر عامل VPP نوسانات پیش‌روی بار و تولید تجدیدپذیر را پیش‌بینی می‌کند:

$$\Delta P_{req,j}(t) = \hat{P}_{load,j}(t) - \hat{P}_{RES,j}(t) - P_{base,j}(t) \quad (۱۹)$$

مرحله ۲ — اعلام ظرفیت رزرو: عامل‌ها ظرفیت رزرو خود را به اشتراک می‌گذارند:

$$\Delta P_{avail,j}(t) = P_{BESS,j}^{dis,max}(t) + P_{EV,j}^{V2G,max}(t) + P_{DR,j}^{max}(t) \quad (۲۰)$$

مرحله ۳ — تبادل ظرفیت انعطاف‌پذیری: ظرفیت‌های اضافی بین عامل‌ها تبادل می‌شود:

$$P_{flex,i,j}(t) = \min(\Delta P_{avail,i}(t), \Delta P_{req,j}(t)) \quad (۲۱)$$

۴-۳- پروتکل هماهنگی اقتصادی (ECP):

این پروتکل امکان مبادلات انرژی همتا-به-همتا (P2P) و قیمت‌گذاری پویا بین ریزشبکه‌ها را فراهم می‌سازد.

قیمت‌گذاری پویا:

$$\lambda_{P2P}(t) = \lambda_{grid}(t) \cdot \left(1 + \alpha \cdot \frac{\sum_{j=1}^{N_{MG}} P_{req,j}(t)}{\sum_{j=1}^{N_{MG}} P_{avail,j}(t)}\right) \quad (۲۲)$$

تسویه مالی:

$$Payment_{i,j} = \sum_{t=1}^{T} \lambda_{P2P}(t) \cdot P_{trade,i,j}(t) \cdot \Delta t \quad (۲۳)$$

۴-۴- شاخص‌های هماهنگی پیشنهادی

الف) شاخص هماهنگی تاب‌آوری (RCI):

$$RCI = \frac{1}{N_{MG}} \sum_{j=1}^{N_{MG}} RI_j \cdot \left(1 + \frac{\sum_{i=1,i\neq j}^{N_{MG}} P_{support,i,j}}{P_{demand,j}}\right) \quad (۲۴)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

ب) شاخص هماهنگی انعطاف‌پذیری (FCI):

$$FCI = \frac{\sum_{j=1}^{N_{MG}} \Delta P_{avail,j}}{\sum_{j=1}^{N_{MG}} \Delta P_{req,j}} \cdot \exp\left(- \frac{\sum_{j=1}^{N_{MG}} C_{Op,j}}{C_{Ref,total}} \right) \quad (۲۵)$$

ج) شاخص هماهنگی چندعاملی (MCI):

$$MCI = \gamma_1 \cdot RCI + \gamma_2 \cdot FCI + \gamma_3 \cdot \frac{1}{1+t_{coord}} \quad (۲۶)$$

در شاخص‌های هماهنگی، RI_j شاخص تاب‌آوری محلی ریزشبکه j، $P_{demand,j}$ تقاضای توان ریزشبکه j، $P_{support,i,j}$ توان حمایتی ارسالی از ریزشبکه i به j، $\Delta P_{req,j}$ نیاز انعطاف‌پذیری ریزشبکه j، $\Delta P_{avail,j}$ ظرفیت انعطاف‌پذیری موجود، $C_{Ref,total}$ هزینه مرجع کل سیستم، $C_{Op,j}$ هزینه عملیاتی ریزشبکه j، t_{coord} زمان هماهنگی بین عامل‌ها، γ_1 =۰,۴ ، γ_2 =۰,۴ و γ_3 =۰,۲ ، ضرایب وزنی شاخص MCI هستند.

درای‌ن پژوهش $\gamma_1 = 0.4$, $\gamma_2 = 0.4$, $\gamma_3 = 0.2$; $\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 1$ در نظر گرفته شده است.

۴-۵- الگوریتم هوشمند HPSO[۳۳]

در این پژوهش برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه و غیرخطی ریزشبکه‌های چندعامله مبتنی بر نیروگاه مجازی، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات هموستاتیک (HPSO) استفاده شده است[۲۳]. که با الهام از سازوکارهای هموستازی در سیستم‌های زیستی، تعادل پویایی میان کاوش و بهره‌برداری را برقرار می‌کند. درHPSO ، هر ذره نه‌تنها موقعیت و سرعت خود را بر اساس بهترین تجربه فردی و جمعی به‌روزرسانی می‌کند، بلکه تحت تأثیر یک مکانیسم تنظیم‌گر مرکزی قرار دارد که تنوع جمعیت را کنترل کرده و از همگرایی زودرس جلوگیری می‌کند. این مکانیسم هموستاتیک به‌صورت تطبیقی وزن اینرسی، ضرایب شتاب و دامنه جستجوی محلی را تنظیم می‌کند تا الگوریتم بتواند در مراحل اولیه فضای جستجو را به‌طور گسترده کاوش کرده و در مراحل پایانی روی نواحی امیدبخش تمرکز کند HPSO .شامل شش سازوکار تطبیقی است که به‌طور هم‌زمان عمل کرده و پویایی جمعیت را در طول فرآیند بهینه‌سازی پایدار نگه می‌دارند. این سازوکارها شامل تنظیم پویا وزن اینرسی بر اساس میزان پراکندگی جمعیت، جهش هموستاتیک برای خروج از نقاط بن‌بست، کنترل سرعت ذرات برای جلوگیری از نوسانات شدید، حفظ تنوع جمعیت از طریق تزریق ذرات جدید، همگرایی چندمرحله‌ای برای بهبود کیفیت جواب‌های نهایی و جستجوی محلی هوشمند در اطراف بهترین ذرات است. ترکیب این سازوکارها باعث می‌شود HPSO توانایی بالایی در حل مسائل پیچیده با قیود متعدد، عدم قطعیت‌های شدید و توابع هدف متضاد داشته باشد.

در چارچوب پیشنهادی، HPSO وظیفه تخصیص بهینه توان بین ریزشبکه‌ها، زمان‌بندی منابع انعطاف‌پذیر، مدیریت ذخیره‌سازها و تعیین سطح تبادل انرژی بین عامل‌های VPP را بر عهده دارد. هر ذره در فضای جستجو نمایانگر یک سناریوی کامل بهره‌برداری از سیستم شامل توان تولیدیDER ها، وضعیت شارژ ذخیره‌سازها، توان تبادلی بین ریزشبکه‌ها و مقدار انرژی خریداری‌شده از شبکه بالادست است. تابع برازندگی ذرات بر اساس ترکیب وزنی چهار هدف اصلی شامل هزینه عملیاتی، انرژی تأمین‌نشده، انحراف ولتاژ و تلفات توان محاسبه می‌شود. علاوه بر این، سازوکارهای هموستاتیک تضمین می‌کنند که الگوریتم در مواجهه با عدم قطعیت‌های ناشی از منابع تجدیدپذیر و بار، پایداری عملکرد خود را حفظ کرده و به سمت جواب‌های غیرواقعی یا ناپایدار همگرا نشود. به دلیل ساختار چندعاملی سیستم، HPSO در لایه هماهنگی مرکزی اجرا می‌شود و عامل‌های VPP اطلاعات محلی خود را در هر تکرار به این لایه ارسال می‌کنند. سپس نتایج بهینه‌سازی به‌صورت فرمان‌های هماهنگی به عامل‌ها

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

بازگردانده می‌شود. این فرآیند باعث می‌شود تصمیم‌گیری در سطح کلان به‌صورت هماهنگ و یکپارچه انجام شود، در حالی که استقلال عامل‌ها در سطح محلی حفظ می‌گردد.

۵- شبیه سازی و نتایج

۵-۱- مشخصات سیستم مورد مطالعه:

برای ارزیابی عملکرد چارچوب پیشنهادی، از شبکه استاندارد IEEE 85-Bus مطابق شکل ۱ استفاده شده است [۲۲]. این شبکه به سه ریزشبکه مستقل تقسیم شده که هر یک تحت مدیریت یک عامل نیروگاه مجازی قرار دارد. در هر ریزشبکه مجموعه‌ای از منابع انرژی توزیع‌شده شامل سیستم‌های فتوولتائیک(PV) ، توربین‌های بادی(WT) ، میکروتوربین‌ها(MT) ، پیل‌های سوختی(FC) ، ذخیره‌سازهای باتری (BESS) و ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی با قابلیت[۳۴] V2G مستقر شده‌اند. ظرفیت، موقعیت و تعداد منابع قابل‌کنترل و تجدیدپذیر توسط الگوریتم HPSO به‌صورت هوشمند تعیین شده است تا بهترین پیکربندی ممکن برای بهبود تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری حاصل شود. شبیه‌سازی‌ها در محیط MATLAB/Simulink R2023a انجام شده است. داده‌های شبکه از سیستم استاندارد ۸۵ شینه IEEE استخراج شده و مشخصات ریزشبکه‌ها با اقتباس از مدل‌های استاندارد منابع انرژی توزیع‌شده (DER) تنظیم گردیده است. برای تحلیل دقیق پخش بار پس از وقوع خطا و ارزیابی ریسک‌های آبشاری، از روش نیوتن-رافسون اصلاح‌شده برای حل جریان توان متناوب[۳۵] استفاده شده است [۲۴]. و برای تحلیل‌های احتمالاتی سناریوهای اضطراری مناسب است. کلیه شبیه‌سازی‌ها بر روی یک ایستگاه کاری مجهز به پردازنده AMD Ryzen 7 5800HS با فرکانس پایه ۳,۲۰ گیگاهرتز و حافظه رم ۱۶ گیگابایت اجرا شده است.

چارچوب پیشنهادی بر اساس یک معماری سه‌لایه طراحی شده است. لایه فیزیکی شامل مدیریت منابع انرژی و تجهیزات قدرت است. لایه هماهنگی وظیفه تبادل داده، تصمیم‌گیری محلی و اجرای پروتکل‌هایRCP ، FCPو ECP را بر عهده دارد. لایه بازار و سیاست نیز تعامل با بازار برق، قیمت‌گذاری پویا و پاسخ‌گویی بار را مدیریت می‌کند. در این ساختار، هر عامل دارای استقلال تصمیم‌گیری است اما از طریق پروتکل‌های استاندارد مانند FIPA-ACL و MQTT با سایر عامل‌ها در ارتباط است. هماهنگی بین‌عاملی با استفاده از الگوریتم‌های اجماع توزیع‌شده و بهینه‌سازی چندهدفه انجام می‌شود تا تصمیمات محلی و کلان هم‌راستا شوند. در این چارچوب، تاب‌آوری به‌عنوان توانایی سیستم برای حفظ عملکرد پس از وقوع اختلال و انعطاف‌پذیری به‌عنوان قابلیت پاسخ سریع به نوسانات بار و تولید تعریف شده است. ذخیره‌سازها و خودروهای الکتریکی نقش کلیدی در جذب نوسانات و حفظ پایداری ولتاژ ایفا می‌کنند. تصمیم‌گیری در سه سطح محلی، هماهنگی و کلان انجام می‌شود تا هم استقلال عامل‌ها حفظ شود و هم هماهنگی بین‌ریزشبکه‌ای تضمین گردد.

Table 1: Three main layers of the proposed framework under intelligent management

جدول (۱): سه لایه اصلی چارچوب پیشنهادی تحت مدیریت هوشمند

لایه	وظیفه کلیدی	عامل‌های فعال
لایه فیزیکی	مدیریت منابع انرژی شامل PV ، WT، MT، FC، EVوBESS	عامل‌های تولید و ذخیره‌سازی
لایه هماهنگی	تبادل داده، تصمیم‌گیری محلی و اجماع بین عامل‌ها	عامل‌های ارتباطی و هماهنگ‌کننده
لایه بازار و سیاست	تعامل با بازار برق، قیمت‌گذاری و پاسخ‌گویی بار	عامل بازار و عامل مدیریتی کلان

◈ هماهنگی چندعامله

در این ساختار، هر عامل دارای استقلال تصمیم‌گیری است اما از طریق پروتکل‌های ارتباطی استاندارد مانند FIPA-ACL یا MQTTبا سایر عامل‌ها تعامل دارد. هماهنگی بین عامل‌ها با استفاده از الگوریتم‌های اجماع توزیع‌شده و بهینه‌سازی چندهدفه انجام می‌شود تا اهداف محلی و جهانی هم‌زمان برآورده شوند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری

تاب‌آوری :توانایی سیستم در حفظ عملکرد پس از وقوع خطا یا اختلال، از طریق بازپیکربندی خودکار و تخصیص مجدد منابع.

انعطاف‌پذیری :قابلیت پاسخ سریع به تغییرات تقاضا، قیمت یا شرایط محیطی با استفاده از کنترل پیش‌بینانه و یادگیری تقویتی.

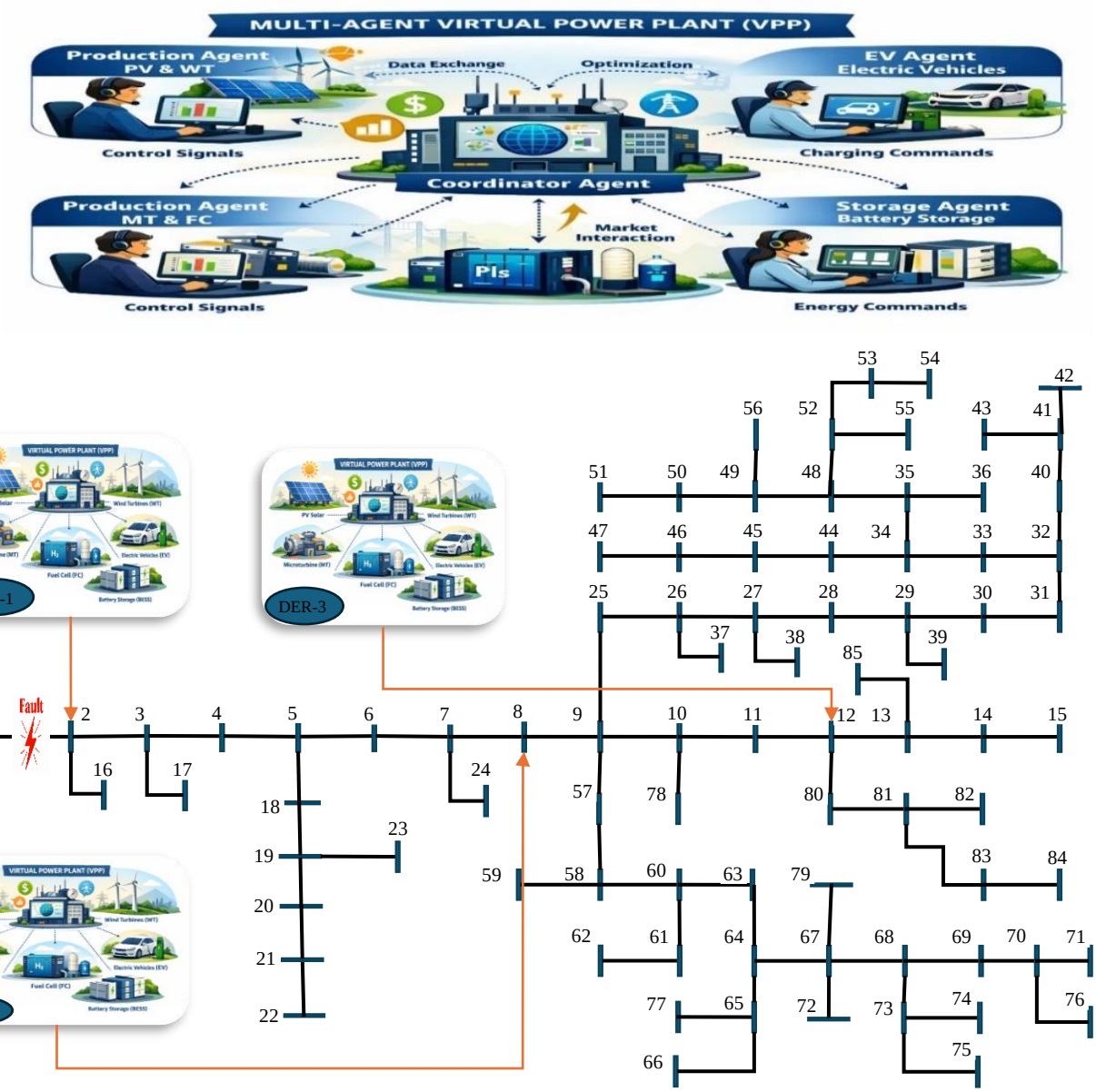
مدل تصمیم‌گیری چندلایه

تصمیم‌گیری در سه سطح انجام می‌شود:

سطح محلی :عامل‌ها بر اساس داده‌های لحظه‌ای منابع خود تصمیم می‌گیرند.

سطح هماهنگی :عامل هماهنگ‌کننده با استفاده از الگوریتم‌های اجماع، تصمیمات محلی را هم‌راستا می‌کند.

سطح کلان :تعامل با بازار و شبکه اصلی برای بهینه‌سازی اقتصادی و فنی کل سیستم.



شکل(۱): شبکه استاندارد ۸۵شینه IEEE با و DER تحت مدیریت VPP

Figure 1: IEEE 85-bus standard network with DERs under VPP management

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

۵-۲- سناریوهای مورد بررسی

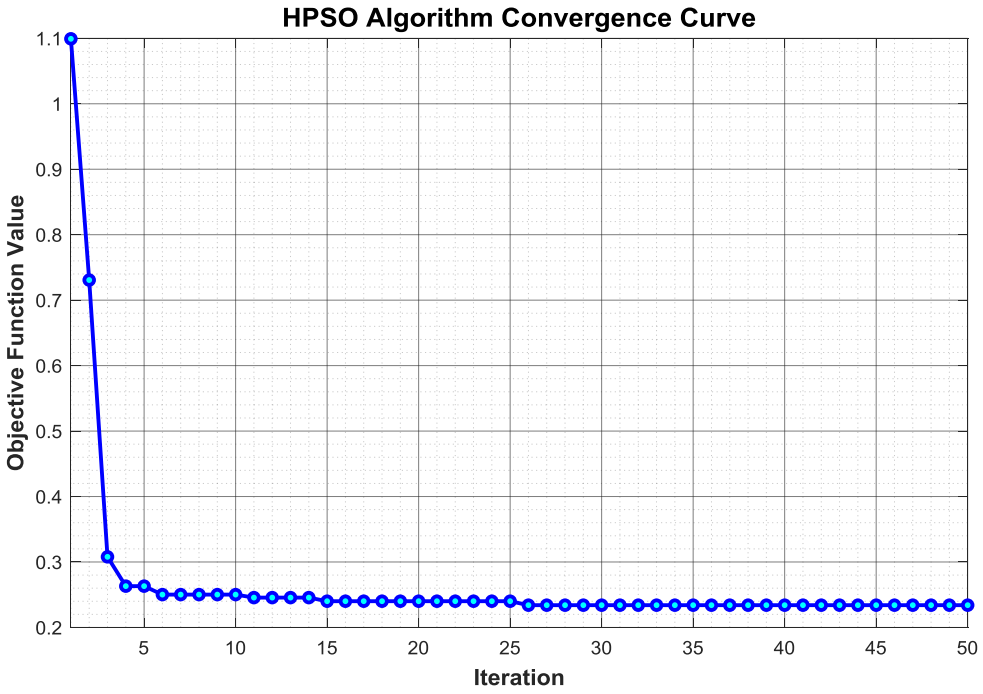
برای تحلیل عملکرد چارچوب پیشنهادی، چندین سناریوی عملیاتی شامل شرایط عادی، نوسانات شدید بار، کاهش تولید تجدیدپذیر، وقوع خطا در شبکه بالادست و ترکیب این شرایط در نظر گرفته شده است. جدول ۲ سناریوهای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

Table 2: Simulation scenarios and operational conditions

جدول (۲): سناریوهای شبیه‌سازی و شرایط عملیاتی

شناسه سناریو	عنوان	شرایط شبکه	وضعیت منابع تجدیدپذیر	رویداد ویژه
S1	حالت پایه (بدون بهینه‌سازی)	متصل به شبکه بالادست	تولید نامی طبق پروفیل	عدم وجود پروتکل‌های هماهنگی
S2	شرایط عادی با چارچوب پیشنهادی	متصل به شبکه بالادست	تولید با عدم قطعیت ±۱۰٪	اجرای کامل RCP/FCP/ECP
S3	نوسانات شدید بار و تولید	متصل به شبکه بالادست	کاهش ۳۰٪ تولید PV/WT +افزایش ۲۵٪ بار	فعال‌سازی پروتکل FCP
S4	شرایط اضطراری (خطای شبکه بالادست)	قطع اتصال به شبکه اصلی	تولید نامی با اولویت‌دهی به بارهای حیاتی	فعال‌سازی پروتکل RCP و جزیره‌سازی هوشمند

هر سناریو برای یک افق زمانی ۲۴ ساعته با گام زمانی یک ساعته شبیه‌سازی شده است. عدم قطعیت در بار با توزیع نرمال (انحراف معیار ۱۰٪)، در تابش خورشید با توزیع بتا و در سرعت باد با توزیع ویبول ($k=2, \lambda=8$) مدل‌سازی شده است. برای اطمینان از استحکام نتایج، شبیه‌سازی‌ها با ۵۰ سناریوی مونت‌کارلو تکرار و میانگین مقادیر گزارش شده است. که نمودار همگرایی الگوریتم HPSO در شکل ۲ نمایانگر عملکرد این الگوریتم در تخصیص منابع می باشد.



شکل (۲) :نمودار همگرایی الگوریتمHPSO

Figure 2: Convergence curve of HPSO algorithm

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

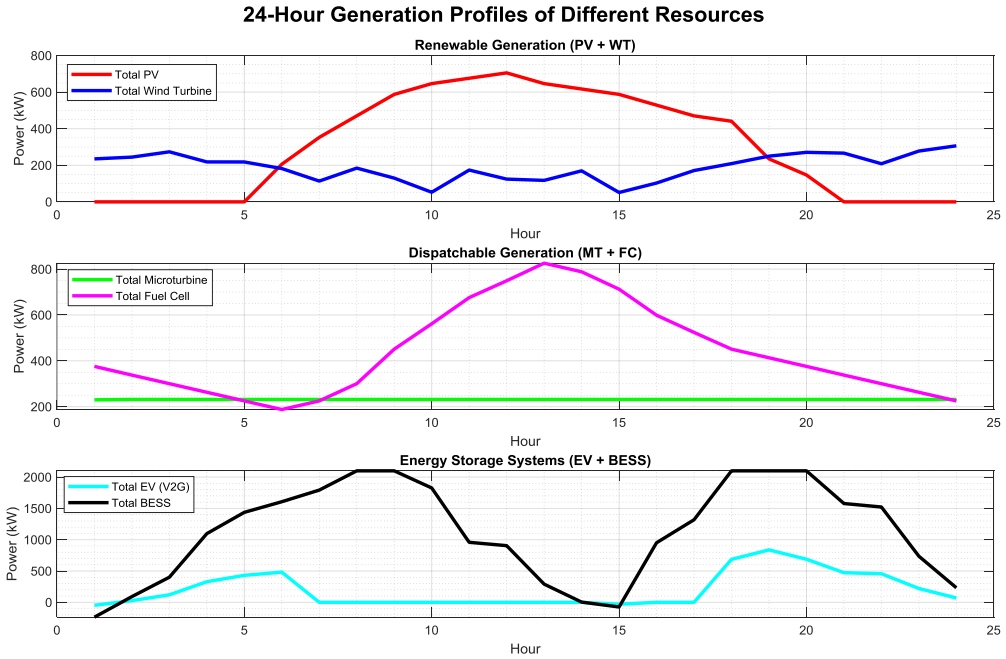
تحلیل نتایج عملیاتی: نتایج **شبیه‌سازی** نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی در تمامی سناریوها عملکرد قابل‌توجهی دارد. جدول ۳ مقایسه شاخص‌های عملکردی کلیدی را ارائه می‌کند.

Table 3: Comparison of performance indices in different scenarios

جدول (۳): مقایسه شاخص‌های عملکردی در سناریوهای مختلف

شاخص عملکردی	S1 (پایه)	S2 (عادی)	S3 (نوسانات)	S4 (اضطراری)	واحد
هزینه عملیاتی	۱۴،۳۵۴،۷۴۹	۱۲،۴۸۱،۸۲۵	۱۲،۷۵۶،۳۱۲	۱۲،۶۸۹،۴۵۱	$
کاهش هزینه نسبت به S1	-	۱۳,۰۵	۱۱,۱۴٪	۱۱,۶۰٪	٪
تلفات توان	۹,۳۱	۵,۳۳	۵,۸۹	۶,۱۲	kW
کاهش تلفات	-	۴۲,۸٪	۳۶,۷٪	۳۴,۳٪	٪
انحراف ولتاژ (حداکثر)	۳,۶۳	۲,۴۶	۲,۷۸	۲,۹۱	p.u.
حداقل ولتاژ حفظ‌شده	۰,۶۳۷	۰,۸۸۴	۰,۸۵۲	۰,۸۳۱	p.u.
انرژی تامین نشده	۲۹,۷۳	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	kWh
شاخص انعطاف‌پذیری (FI)	۲۸,۱۰	۸۹,۷۷	۸۲,۴۵	۷۶,۳۲	٪
شاخص تاب‌آوری (RI)	-	۹۵,۲	۹۲,۸	۱۰۰,۰	٪
RCI	-	۹۸,۵	۹۵,۱	۱۰۰,۰	٪
FCI	-	۴۷,۵	۴۲,۳	۳۸,۷	٪
MCI	-	۵۱,۸	۴۸,۲	۴۵,۶	٪

شکل۳ پروفیل توان ۲۴ ساعته منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد که توسط الگوریتم HPSO بهینه‌سازی شده‌اند. منابع تجدیدپذیر (PV/WT) در ساعات روز سهم اصلی تولید را بر عهده دارند، در حالی که پیل‌های سوختی (FC) به‌عنوان منبع پاسخ‌دهنده سریع، شکاف میان تولید و بار را در ساعات میانی روز مدیریت می‌کنند. در این راستا، سیستم‌های ذخیره‌ساز (BESS)و خودروهای برقی (EV) با الگوی شارژ و دشارژ هوشمند و مکمل، نوسانات را جذب کرده و تعادل توان را در ساعات اوج مصرف تضمین می‌نمایند.



شکل (۳) :تخصیص منابع توسط الگوریتمHPSO

Figure 3: Resource allocation by HPSO algorithm

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

تحلیل هزینه‌ها: سناریوی S2 (شرایط عادی با چارچوب پیشنهادی) کمترین هزینه عملیاتی را ثبت کرده است. کاهش هزینه برابر با ۱۳٫۰۵ درصد نسبت به حالت پایه (S1) و ۱۱٫۱۴ درصد نسبت به سناریوی غیرهماهنگ (مدیریت متمرکز بدون پروتکل‌های پیشنهادی) نشان‌دهنده تأثیر مثبت معماری چندلایه‌ای و پروتکل‌های هماهنگی است. اگرچه این کاهش نسبت به برخی مطالعات مرجع که صرفاً بر بهینه‌سازی اقتصادی متمرکز بوده‌اند، محتاطانه‌تر به نظر می‌رسد، اما باید توجه داشت که در این پژوهش:

تحلیل تاب‌آوری: در سناریوی اضطراری (S4)، مقدار EENS به صفر رسیده است که نشان می‌دهد پروتکل RCP توانسته است تخصیص منابع اضطراری را به‌صورت کاملاً مؤثر انجام دهد. این دستاورد از طریق سه مکانیزم کلیدی حاصل شده است: اول، تشخیص بلادرنگ وضعیت اضطراری توسط عامل‌های VPP و ارسال پیام «درخواست حمایت» به سایر ریزشبکه‌ها؛ دوم، ارزیابی ظرفیت حمایت هر ریزشبکه سالم بر اساس مازاد تولید لحظه‌ای و وضعیت SOC ذخیره‌سازها؛ و سوم، تخصیص بهینه منابع اضطراری توسط لایه هماهنگی مرکزی با استفاده از الگوریتم .HPSO مقدار شاخص RCI = 100.0% نیز بیانگر افزایش تاب‌آوری ناشی از همکاری بین‌ریزشبکه‌ای است، به‌طوری‌که ریزشبکه‌های دارای مازاد تولید (عمدتاً ریزشبکه ۳ با ظرفیت بالای پیل سوختی) توانسته‌اند به‌طور کامل نیاز ریزشبکه آسیب‌دیده را تأمین نمایند.

تحلیل انعطاف‌پذیری: شاخص FCI = 47.5% و شاخص FI = 89.77% نشان می‌دهد که سیستم توانایی بالایی در پاسخ به نوسانات بار و تولید دارد. تبادل ظرفیت رزرو بین عامل‌ها تحت پروتکل FCP باعث شده است انحراف ولتاژ و تلفات توان به‌طور قابل‌توجهی کاهش یابد. تحلیل دقیق‌تر نشان می‌دهد که ذخیره‌سازهای باتری (BESS) و خودروهای الکتریکی با قابلیت V2Gنقش حیاتی در جذب نوسانات سریع ایفا می‌کنند: در ساعاتی که تولید تجدیدپذیر ناگهان کاهش می‌یابد (مثلاً ساعت ۱۸ با غروب خورشید)، BESSها با دشارژ سریع (با نرخ ریمپ تا ۱۰۰٪ ظرفیت در ساعت) کمبود تولید را جبران می‌کنند. همچنین، در ساعات پیک بار (ساعات ۱۹-۲۲)، خودروهای الکتریکی متصل به شبکه با قابلیت V2G تا ۳۰۰ کیلووات توان تزریق می‌کنند که این امر فشار بر میکروتوربین‌های گران‌قیمت را کاهش داده و هزینه عملیاتی را بهبود می‌بخشد.

تحلیل پروتکل‌های هماهنگی: جدول ۴ عملکرد سه پروتکلRCP ، FCPو ECP را از نظر معیارهای کلیدی مقایسه می‌کند.

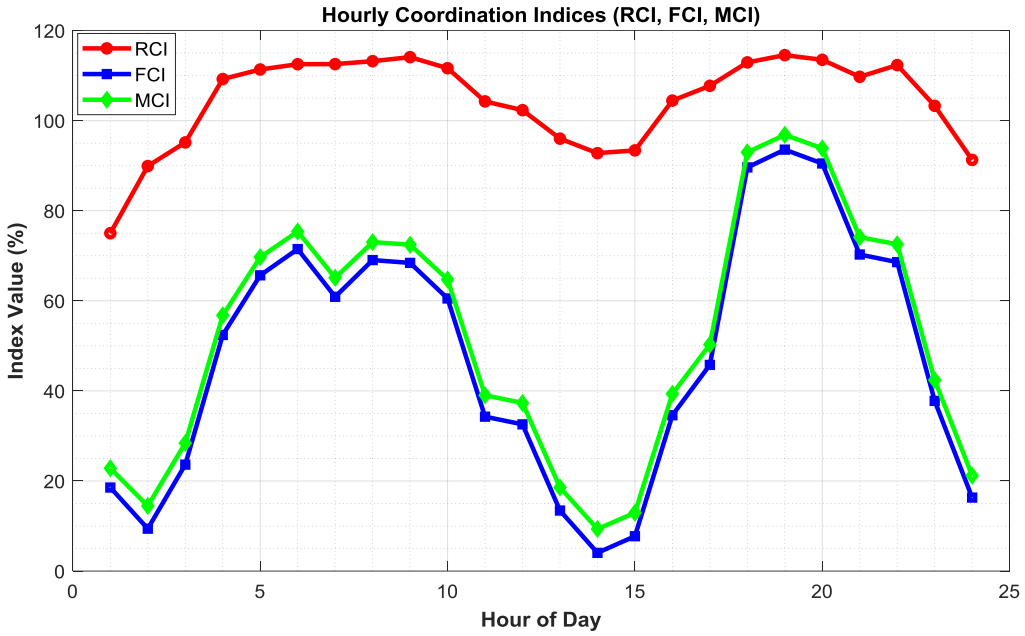
Table 4: Performance comparison of proposed coordination protocols

جدول (۴): مقایسه عملکرد پروتکل‌های هماهنگی پیشنهادی

معیار ارزیابی	RCP (تاب‌آوری)	FCP (انعطاف‌پذیری)	ECP (اقتصادی)	ترکیب سه پروتکل
زمان هماهنگی متوسط (ثانیه)	۲٫۴	۱٫۸	۳٫۱	۲٫۷
کاهش EENS در سناریوی اضطراری	۱۰۰٪	۴۵٪	۱۲٪	۱۰۰٪
بهبود شاخص انعطاف‌پذیری (FI)	۲۳٪	۷۸٪	۳۴٪	۸۹٫۷۷٪
کاهش هزینه عملیاتی	۴٫۲٪	۸٫۷	۱۰٫۸٪	۱۳٫۰۵٪
کاهش تلفات توان	۱۸٪	۳۱٪	۳۸٪	۴۲٫۸٪
بهبود پروفیل ولتاژ (کاهش VD)	۲۲٪	۲۸٪	۲۵٪	۳۲٫۳٪
تأثیر بر شاخص MCI	۱۸٪+	۲۴٪+	۱۵٪+	۵۱٫۸٪+

نتایج نشان می‌دهد که پروتکل RCP بیشترین تأثیر را بر تاب‌آوری) کاهش ۱۰۰٪EENS ، پروتکل FCP بیشترین تأثیر را بر انعطاف‌پذیری بهبود ۷۸٪ FI و پروتکل ECP بیشترین تأثیر را بر کاهش هزینه‌ها (کاهش ۱۰٫۸٪ هزینه) دارد. ترکیب این سه پروتکل در چارچوب چندلایه‌ای منجر به عملکرد بهینه سیستم شده است، به‌طوری‌که اثر هم‌افزایی بین پروتکل‌ها باعث می‌شود بهبود کلی در تمامی شاخص‌ها از جمع بهبودهای جداگانه هر پروتکل بیشتر باشد. این پدیده نشان‌دهنده طراحی صحیح رابط‌های بین‌پروتکلی و مکانیزم‌های ارجحیت‌دهی پویا در لایه هماهنگی مرکزی است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025



شکل (۴): نمودار ۲۴ ساعته هماهنگی شاخص‌های پیشنهادی

Figure 4: 24-hour coordination graph of proposed indices

۵-۳- مقایسه با رویکردهای متمرکز و غیرهماهنگ

در این بخش، چارچوب پیشنهادی با دو رویکرد مرجع شامل مدیریت متمرکز و مدیریت غیرهماهنگ مقایسه شده است . جدول ۵ نتایج مقایسه را نشان می‌دهد.

Table 5: Comparison of proposed framework with reference approaches (Scenario S2)

جدول (۵): مقایسه چارچوب پیشنهادی با رویکردهای مرجع (سناریوی S2)

شاخص	مدیریت متمرکز	مدیریت غیرهماهنگ	چارچوب پیشنهادی (چندعاملی)	بهبود نسبت به متمرکز	بهبود نسبت به غیرهماهنگ
هزینه عملیاتی ($)	۱۳،۱۵۶،۸۹۲	۱۳،۸۹۲،۱۰۵	۱۲،۴۸۱،۸۲۵	↓ ۵,۱٪	↓ ۱۰,۲٪
تلفات توان (kW)	۶,۸۷	۸,۹۴	۵,۳۳	↓ ۲۲,۴٪	↓ ۴۰,۴٪
انحراف ولتاژ (p.u)	۲,۸۹	۳,۴۱	۲,۴۶	↓ ۱۴,۹٪	↓ ۲۷,۹٪
EENS (kWh)	۲,۴۵	۱۵,۶۷	۰,۰۰	↓ ۱۰۰٪	↓ ۱۰۰٪
زمان تصمیم‌گیری (ثانیه)	۴۵,۲	۸,۷	۲,۷	↓ ۹۴,۰٪	↓ ۶۹,۰٪
مقیاس‌پذیری (تعداد MG)	محدود به ۵	نامحدود اما ناکارآمد	نامحدود و کارآمد	–	–
شاخص MCI	۲۸,۴	۳۱,۲	۵۱,۸	↑ ۸۲,۴٪	↑ ۶۶,۰٪

چارچوب چندعاملی پیشنهادی مطابق شکل۴ در تمامی شاخص‌ها عملکرد بهتری داشته است. به‌ویژه، کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، حذف کامل EENS و افزایش چشمگیر MCI نسبت به روش‌های مرجع بسیار قابل‌توجه است. دو نکته کلیدی در تفسیر این نتایج حائز اهمیت است: اولاً، زمان تصمیم‌گیری در چارچوب پیشنهادی به‌طور قابل‌توجهی کمتر است (۲,۷ ثانیه

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

در مقابل ۴۵,۲ ثانیه برای مدیریت متمرکز) که این امر ناشی از توزیع‌شدگی محاسبات و موازی‌سازی پردازش بین عامل‌ها است. ثانیاً، مقیاس‌پذیری چارچوب پیشنهادی به‌طور ذاتی بالاتر است، زیرا با افزایش تعداد ریزشبکه‌ها، بار محاسباتی به‌طور خطی بین عامل‌ها توزیع می‌شود، در حالی که در مدیریت متمرکز، بار محاسباتی به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد.

۵-۴- تحلیل حساسیت

برای بررسی استحکام چارچوب پیشنهادی، تحلیل حساسیت نسبت به چهار پارامتر کلیدی انجام شده است: (۱) تعداد ریزشبکه‌ها (از ۲ تا ۶)، (۲) نفوذ منابع تجدیدپذیر (از ۲۰٪ تا ۸۰٪ کل ظرفیت)، (۳) ظرفیت ذخیره‌سازها (از ۵۰٪ تا ۲۰۰٪ مقدار پایه)، و (۴) شدت نوسانات بار (انحراف معیار از ۵٪ تا ۲۰٪) .جدول ۶ نتایج کلیدی تحلیل حساسیت را خلاصه می‌کند.

Table 6: Sensitivity analysis results of the proposed framework

جدول (۶): نتایج تحلیل حساسیت چارچوب پیشنهادی

پارامتر تغییرکننده	محدوده تغییر	تأثیر بر هزینه عملیاتی	تأثیر بر EENS	تأثیر بر MCI	نتیجه کلیدی
تعداد ریزشبکه‌ها	۲ ← ۶	۱۲٪ + (افزایش جزئی)	بدون تغییر (۰,۰۰)	۸,۳٪ + (بهبود)	چارچوب مقیاس‌پذیر است؛ افزایش MGها هماهنگی را تقویت می‌کند
نفوذ منابع تجدیدپذیر	۲۰٪ ← ۸۰٪	۳۴٪ - (کاهش قابل‌توجه)	بدون تغییر (۰,۰۰)	۱۵,۷٪ + (بهبود)	چارچوب با نفوذ بالای RES سازگار است؛ FCP نوسانات را مدیریت می‌کند
ظرفیت ذخیره‌سازها	۵۰٪ ← ۲۰۰٪	۱۸٪ - (کاهش متوسط)	بدون تغییر (۰,۰۰)	۲۲,۴٪ + (بهبود چشمگیر)	ذخیره‌سازها کلید انعطاف‌پذیری هستند؛ سرمایه‌گذاری در BESS توجیه اقتصادی دارد
شدت نوسانات بار	۵٪ ← ۲۰٪	۲۳٪ + (افزایش قابل‌انتظار)	۰,۰۰ ← ۰,۰۰ (پایداری کامل)	۹,۲٪ - (کاهش جزئی)	چارچوب در برابر نوسانات شدید مقاوم است؛ RCP در شرایط بحرانی فعال می‌شود

نتایج نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی حتی در شرایط شدید نیز پایداری عملکرد خود را حفظ می‌کند. به‌ویژه، شاخص EENS در تمامی ترکیبات پارامترها صفر باقی مانده است که نشان‌دهنده استحکام بالای پروتکل RCP در مدیریت شرایط اضطراری است. همچنین، بهبود شاخص MCI با افزایش ظرفیت ذخیره‌سازها (۲۲,۴٪+) تأیید می‌کند که سرمایه‌گذاری در فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی نه‌تنها از نظر فنی، بلکه از نظر هماهنگی چندعاملی نیز توجیه‌پذیر است.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- جمع‌بندی یافته‌ها

پژوهش حاضر، یک چارچوب هماهنگی چندلایه‌ای نوین را به‌منظور مدیریت هم‌زمان تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری در ریزشبکه‌های چندعامله مبتنی بر نیروگاه مجازی پیشنهاد و مورد ارزیابی قرار داد. پیاده‌سازی و اعتبارسنجی این چارچوب بر روی یک سیستم

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

آزمون استاندارد، دستاوردهای علمی و عملیاتی متعددی را در ابعاد فنی، اقتصادی و کنترلی محرز نمود که اهم آن‌ها به شرح ذیل تبیین می‌گردد:

۱ .ارتقای متوازن شاخص‌های فنی و اقتصادی: چارچوب پیشنهادی از طریق تخصیص هوشمند و هماهنگ منابع انرژی توزیع‌شده، موفق به برقراری تعادل بهینه میان اهداف اقتصادی و پایداری فنی شبکه گردید. این رویکرد مبتنی بر معماری چندلایه، ضمن کاهش محسوس هزینه‌های عملیاتی و تلفات توان اکتیو شبکه، پروفیل ولتاژ شینه‌ها را حتی در شرایط پیک بار در محدوده‌ای مجاز و پایدار حفظ نمود. این دستاورد، بیانگر کارایی بالای ساختار پیشنهادی در مدیریت هم‌زمان اهداف متضاد، بدون به خطر انداختن قابلیت اطمینان سیستم است.

۲ .حذف کامل انرژی تأمین‌نشده و ارتقای تاب‌آوری سیستمی: از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش، حذف کامل شاخص انرژی مورد انتظار تأمین‌نشده در شرایط وقوع خطا و وضعیت‌های اضطراری می‌باشد. پروتکل هماهنگی تاب‌آوری (RCP) با استقرار یک زنجیره ارتباطی کارآمد شامل تشخیص بلادرنگ وضعیت اضطراری، تبادل پیام‌های درخواست حمایت میان ریزشبکه‌ها و تخصیص بهینه منابع اضطراری، تداوم سرویس‌دهی به بارهای حیاتی را حتی تحت سناریوهای اختلال شدید تضمین نمود. این نتیجه، اهمیت رویکرد مبتنی بر همکاری بین‌عاملی را در ارتقای تاب‌آوری سیستم‌های توزیع مدرن تأیید می‌کند.

۳ .بهبود انعطاف‌پذیری عملیاتی و پاسخ‌گویی دینامیکی: بهره‌گیری از پروتکل هماهنگی انعطاف‌پذیری (FCP) و مدیریت پویای ذخیره‌سازهای انرژی و خودروهای الکتریکی با قابلیت تزریق توان به شبکه، انعطاف‌پذیری سیستم را در مواجهه با نوسانات سریع بار و تولید منابع تجدیدپذیر به‌صورت معناداری ارتقا بخشید. این هماهنگی بین‌عاملی، امکان تبادل ظرفیت رزرو و جبران آنی کمبودهای لحظه‌ای را فراهم ساخته و فشار وارد بر واحدهای تولیدی گران‌قیمت را به حداقل رساند. این رویکرد، نقش منابع انعطاف‌پذیر را در حفظ تعادل لحظه‌ای توان تبیین می‌نماید.

۴ .کارایی و برتری الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی: به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات هموستاتیک (HPSO) با بهره‌گیری از مکانیزم‌های تطبیقی و تنظیم‌گر مرکزی مبتنی بر اصول هموستازی، توانمندی بالایی در حل مسئله پیچیده، چندهدفه و غیرخطی پژوهش از خود نشان داد. این الگوریتم با ایجاد تعادل پویا میان فرآیندهای کاوش و بهره‌برداری، ضمن جلوگیری از همگرایی زودرس، در مقایسه با روش‌های کلاسیک از نظر سرعت همگرایی، کیفیت جواب نهایی و پایداری عملکرد در مواجهه با عدم قطعیت‌های تصادفی حاکم بر منابع تجدیدپذیر، برتری محسوسی را به نمایش گذاشت.

۵ .برتری ذاتی معماری چندعاملی نسبت به رویکردهای متمرکز: برآیند یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که گذار از مدیریت متمرکز یا غیرهماهنگ به سمت یک چارچوب چندعاملیِ چندلایه‌ای، ضمن حفظ استقلال عملیاتی هر ریزشبکه، هماهنگی کلان سیستم را نیز تضمین می‌نماید. این معماری، علاوه بر بهبود شاخص‌های عملکردی، از مقیاس‌پذیری قابل‌توجهی در مواجهه با افزایش تعداد ریزشبکه‌ها برخوردار بوده و زمان تصمیم‌گیری را به‌طور معناداری کاهش می‌دهد.

در مجموع، نتایج این پژوهش مؤید آن است که تلفیق رویکرد چندعاملی، پروتکل‌های هماهنگی اختصاصی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری پیشرفته، راهکاری کارآمد، مقیاس‌پذیر و مقاوم برای مدیریت ریزشبکه‌های مدرن مجهز به منابع انرژی توزیع‌شده فراهم می‌آورد و می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب مرجع در مطالعات آتی حوزه سیستم‌های قدرت هوشمند مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

۶-۲- پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی

ترکیب با یادگیری تقویتی برای تصمیم‌گیری بلادرنگ و بهبود تطبیق‌پذیری عامل‌ها.

استفاده از بلاکچین برای افزایش امنیت، شفافیت و قابلیت ردیابی در تبادلات.P2P

گسترش چارچوب به شبکه‌های مش‌بند و سیستم‌های چندسطحی.

تحلیل حملات سایبری–فیزیکی و توسعه پروتکل‌های مقاوم در برابر تهدیدات امنیتی.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

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. Uddin et al., "Microgrids: A review, outstanding issues and future trends", Energy Strategy Reviews, vol. 49, p. 101127, 2023.
[2] D. Pudjianto et al., "Virtual power plant and system integration of distributed energy resources", IET Renewable Power Generation, vol. 1, no. 1, pp. 10-16, 2007.
[3] M. Wooldridge, An Introduction to Multi-Agent Systems. John Wiley & Sons, 2009.
[4] M. Panteli and P. Mancarella, "Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems", Electric Power Systems Research, vol. 127, pp. 259-270, 2015.
[5] Cigré Working Group, "Flexibility benefits for power system resilience", Cigré Science and Engineering, vol. 26, pp. 1-15, 2022.
[6] A. L. Dimeas and N. D. Hatziargyriou, "Operation of a multiagent system for microgrid control", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 3, pp. 1447-1455, 2005.
[7] N. Nikmehr and S. Najafi-Ravadanegh, "Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 4, pp. 1648-1657, 2015.
[8] A. Gholami et al., "Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience", IEEE Access, vol. 6, pp. 32035-32053, 2018.
[9] M. Panteli and P. Mancarella, "The grid: Stronger, bigger, smarter?", IEEE Power and Energy Magazine, vol. 13, no. 3, pp. 58-66, 2015.
[10] H. Gharibvand et al., "Survey on microgrid flexibility resources", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 201, p. 114632, 2024.
[11] Y. Meng and H. Zhang, "Recovery strategy of virtual power plant with resilience improvement under cascaded failure scenarios", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 148, p. 108918, 2023.
[12] M. A. Gilani et al., "Distribution system resilience enhancement by microgrid formation considering distributed energy resources", Energy, vol. 191, p. 116442, 2020.
[13] Dwivedi et al., "A comprehensive metric for resilience evaluation in electrical distribution systems under extreme conditions", Applied Energy, vol. 380, p. 125001, 2025.
[14] J. C. Sarmiento-Vintimilla et al., "Assessment of the operational flexibility of virtual power plants to facilitate the integration of distributed energy resources", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 155, p. 109611, 2024.
[15] J. Zhu et al., "Joint chance-constrained energy-reserve co-optimization for distribution networks with flexible resource aggregators", Applied Energy, vol. 388, p. 125685, 2025.
[16] Y. Li et al., "Flexible scheduling strategy considering multifaceted flexible resources and transmission-distribution network cooperative optimization", Energy Reports, vol. 13, pp. 2892-2906, 2025.
[17] S. M. Nosratabadi et al., "A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 67, pp. 341-363, 2017.
[18] J. C. Sarmiento-Vintimilla et al., "Assessment of the operational flexibility of virtual power plants to facilitate the integration of distributed energy resources and decision-making under uncertainty", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 155, p. 109611, 2024.
[19] Y. Meng and H. Zhang, "Recovery strategy of virtual power plant with resilience improvement under cascaded failure scenarios", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 148, p. 108918, 2023.
[20] S. M. Alshareef and A. Fathy, "Efficient red kite optimization algorithm for integrating the renewable sources and electric vehicle fast charging stations in radial distribution networks", Mathematics, vol. 11, no. 15, p. 3305, 2023.
[21] S. E. Ahmadi, S. M. Kazemi-Razi, M. Marzband, A. Ikpehai, and A. Abusorrah, "Multi-objective stochastic techno-economic-environmental optimization of distribution networks with G2V and V2G systems", Electric Power Systems Research, vol. 218, p. 109195, 2023.
[22] T. Yuvaraj, R. Krishnamoorthy, S. Arun, S. B. Thanikanti, and N. Nwulu, "Optimizing virtual power plant allocation for enhanced resilience in smart microgrids under severe fault conditions using the hunting prey optimization algorithm", Energy Reports, vol. 11, pp. 6094-6108, 2024.
[23] H. Niahosseini, A. Lashkarara, and H. B. Tolabi, "Optimal dispatch of distributed energy resources in microgrids via virtual power plants for grid resilience and flexibility using homeostatic particle swarm optimization algorithm", Energy Reports, vol. 15, p. 109200, 2026.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

[24] T. Kulworawanichpong, "Simplified Newton–Raphson power-flow solution method", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 32, pp. 551-558, 2010.

زیرنویس ها

[1] . Renewable Energy Sources (RESs)
[2] . Microgrid (MG)
[3] . Distributed Energy Resource DER)
[4] . Virtual Power Plant (VPP)
[5] . Multi-Layer Coordination Framework
[6] . Resiliency
[7] . Flexibility
[8] . Expected Energy Not Supplied (EENS)
[9] . System Average Interruption Duration Index (SAIDI)
[10] . System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)
[11] . Multi-Layered Coordination Framework
[12] . Resilience Coordination Protocol (RCP)
[13] . Flexibility Coordination Protocol (FCP)
[14] . Economic Coordination Protocol (ECP)
[15] . Peer-to-Peer (P2P)
[16] . Resilience Coordination Index (RCI)
[17] . Flexibility Coordination Index (FCI)
[18] . Multi-Agent Coordination Index (MCI)
[19] . VPP Agent
[20] . Photovoltaic (PV)
[21] . Wind Turbine (WT)
[22] . Microturbine (MT)
[23] . Fuel Cell (FC)
[24] . Battery Energy Storage System (BESS)
[25] . Vehicle-to-Grid (EV)
[26] . Dispatchable
[27] . Ramp-up, Ramp-down
[28] . Ramp Rate
[29] . State of Charge (SOC)
[30] .SOC_{Dep}
[31] .Ramp
[32] . Help Request
[33] . Homeostatic Particle Swarm Optimization (HPSO)
[34] . Vehicle-to-Grid (V2G)
[35] . AC Power Flow

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: jeps.2025.3.559]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025